



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

TRABAJO FIN DE MASTER

Diseño y caracterización de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda mediante láseres de fibra con emisión multilínea

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Alumno: Ion Iturri Gil

Directores: Rosa Ana Pérez Herrera

Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 20 de Junio de 2014

Índice

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| CAPÍTULO I | Resumen | 3 |
| CAPÍTULO II | Conceptos teóricos generales..... | 7 |
| 2.1. | Introducción | 8 |
| 2.2. | Amplificación óptica | 8 |
| 2.2.1. | Efecto Láser | 9 |
| 2.2.2. | Amplificadores de fibra dopada con Erbio | 10 |
| 2.2.3. | Amplificación Raman | 13 |
| 2.3. | Láseres de fibra | 17 |
| 2.4. | Láseres de fibra dopada con Erbio con configuración en anillo | 18 |
| CAPÍTULO III | Estado del arte y objetivos..... | 21 |
| 3.1. | Estado del arte de láseres de fibra óptica | 22 |
| 3.1.1. | Introducción | 22 |
| 3.1.2. | Principio de funcionamiento | 22 |
| 3.1.3. | Diseño de láseres de fibra óptica..... | 24 |
| 3.1.4. | Aplicaciones..... | 29 |
| 3.1.5. | Situación del mercado de los láseres de fibra óptica | 31 |
| 3.1.6. | Tipos de láseres según el método de generación de las longitudes de onda | 33 |
| 3.1.7. | Limitaciones de los láseres | 34 |
| 3.2. | Trabajos preliminares | 37 |
| 3.3. | Objetivo..... | 38 |
| CAPÍTULO IV | Montaje y resultados..... | 39 |
| 4.1. | Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica mediante la introducción de PS-FBGs. | 40 |
| 4.1.1. | Funcionamiento del láser de bombeo junto al fibras dopados | 40 |
| 4.1.2. | Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica sin introducir PS-FBGs. | 41 |
| 4.1.3. | Introducción de los PS-FBGs..... | 43 |
| 4.1.4. | Utilización de láseres de bombeo a 980 nm con potencias de 330 y 450mW .. | 45 |

| | | |
|---------------------|---|------------|
| 4.1.5. | Caracterización..... | 48 |
| 4.1.6. | Anchura de línea | 52 |
| 4.1.7. | Potencia umbral de acción del láser..... | 54 |
| 4.1.8. | Estabilidad de las líneas de emisión..... | 55 |
| 4.2. | Aplicaciones como sensor remoto mediante el uso de amplificación Raman | 57 |
| 4.2.1. | Análisis del sistema para diferentes longitudes de fibra óptica | 57 |
| 4.2.2. | Análisis del sistema con 50km..... | 59 |
| 4.2.3. | Análisis del sistema con dos tramos de fibra óptica de 50 y 25km junto con fibra compensadora de dispersión (DCF)..... | 61 |
| 4.2.4. | Análisis experimental del setup incluyendo fibra fuertemente dopada con erbio Er-30 | 63 |
| 4.2.5. | Análisis del sistema con dos tramos de fibra óptica de 50 km | 64 |
| 4.2.6. | Sensores de temperatura..... | 65 |
| 4.2.7. | Anchura de línea | 68 |
| 4.3. | LUNA: comportamiento de componentes y mejora de resolución..... | 70 |
| 4.3.1. | Caracterización de FBG, PS-FBG y FBG chirpeado con reflectómetro óptico..... | 70 |
| 4.3.2. | Mejora de resolución con Waveshaper | 76 |
| 4.3.3. | Mejora de resolución utilizando microposicionadores. | 78 |
| 4.4. | Estudio de consecución de líneas de emisión monomodo mediante LUNA OBR .. | 86 |
| 4.4.1. | Láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda | 86 |
| 4.4.2. | Láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda medido mediante LUNA OBR 4600 | 88 |
| 4.4.3. | Comparación monomodo vs multimodo mediante LUNA | 90 |
| CAPÍTULO V | Material utilizado | 99 |
| 5.1. | Material de medición | 100 |
| 5.2. | Componentes activos | 103 |
| 5.3. | Componentes pasivos..... | 106 |
| CAPÍTULO VI | Conclusiones y Líneas futuras | 111 |
| CAPÍTULO VII | Bibliografía | 115 |
| ANEXO | Publicación (revisión) | 121 |

CAPÍTULO I Resumen

En los sistemas de fibra óptica existen principalmente dos campos sobre los que actualmente se están realizando numerosas investigaciones. El primero de ellos son las estructuras de fibra óptica para la monitorización remota de sensores y la segunda, la implementación de estructuras utilizadas para generar láseres multilínea. Ambas estructuras tienen en común la utilización de redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBG) para la selección de longitudes de onda de emisión así como el uso de diversos tipos de amplificación óptica. Estos sistemas también abarcan nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda (WDM según sus siglas en inglés).

El uso de FBGs para la monitorización remota es posible gracias a su naturaleza selectiva en longitud de onda, así como de la dependencia de ésta con magnitudes físicas como la temperatura o las microdeformaciones entre otras. Gracias a esta selectividad en longitud de onda resulta más sencillo implementar sistemas de multiplexación de sensores dentro de una misma red, en donde cada FBG, que puede actuar también como sensor, podrá ser interrogado analizando su variación en longitud de onda. Por otro lado, las FBGs se usan también para la generación de láseres multilínea. Es habitual el uso de estructuras de fibra óptica en anillo donde se introduce amplificación óptica con el fin de conseguir la una emisión simultánea de las longitudes de onda correspondientes a las FBGs.

La amplificación óptica necesaria para este tipo de estructuras se consigue principalmente mediante dos métodos diferentes en función de las necesidades del sistema. En ocasiones el método de amplificación necesario es el uso de fibras fuertemente dopadas con Erblio junto con un láser de bombeo externo, consiguiendo así implementar un amplificador de fibra dopada con erbio o EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Por otra parte, para la interrogación de sensores remotos se usan habitualmente amplificadores basados en no linealidades como la dispersión Raman, con los que se obtendrá una amplificación distribuida a lo largo de toda la fibra sometida a estudio.

Estos aspectos se tratan en profundidad en este Trabajo Fin de Master (TFM) tanto en el estado del arte como a través del estudio experimental de diversas estructuras utilizando ambas técnicas de amplificación óptica. Por otro lado se trabaja en el estudio y aprendizaje del manejo y funcionamiento del reflectómetro óptico LUNA OBR 4600. Este reflectómetro proporciona una capacidad de inspección y diagnóstico sin precedentes para la industria de la fibra óptica, siendo el líder mundial en resolución espacial con valores de resolución tan altos como 10 μm .

Mediante el uso de este dispositivo LUNA se realiza un estudio con el objetivo de aumentar aún más esta resolución. Para ello se utilizan microposicionadores con el fin de aplicar un retardo mediante el estiramiento de la fibra óptica. Al realizar este estiramiento de la fibra se consigue aumentar su longitud, teniendo en cuenta que dicho estiramiento debe de ser mínimo para no modificar la señal que circula por la fibra óptica.

Por último se analiza, mediante el mismo reflectómetro óptico, una estructura capaz de genera varias líneas de emisión monomodo. Estos láseres en anillo de fibra dopada con erbio, capaces de operar en régimen monomodo y con una respuesta óptica estable, resultan muy útiles para diferentes aplicaciones como la caracterización de fibra óptica, de redes de multiplexación de

sensores o el test de instrumentos. Con el objetivo de comprobar el comportamiento de estas estructuras en operación monomodo, se realiza un detallado análisis experimental mediante el reflectrómetro óptico LUNA.

Para finalizar, cabe destacar el hecho de que el trabajo experimental llevado a cabo para conseguir aumentar la resolución del LUNA ha supuesto un ambicioso reto con el que se abre la puerta a estudios pioneros en el análisis de efectos como el *hole burning*, relevantes en el diseño de láseres de fibra óptica.

CAPÍTULO II Conceptos teóricos generales

2.1. Introducción

La fibra óptica desde su entrada en el mercado comercial en los años 70, se encuentra en una etapa continua de evolución y desarrollo, convirtiéndose en la protagonista de las telecomunicaciones, redes de datos y empresas de TV por Cable.

Desde hace aproximadamente 10 años hasta la actualidad la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información, revolucionando los procesos de telecomunicaciones y logrando una mayor velocidad en la transmisión, disminuyendo casi en su totalidad los ruidos y las interferencias, e incluso multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica.

Los láseres de fibra han sido y siguen siendo objeto de una gran investigación, explotando su potencial y propiedades de emisión y su habilidad para generar luz a diferentes longitudes de onda para así poder aplicarlas en áreas tales como las telecomunicaciones o el procesamiento de materiales. Para ello se usan diferentes medios de ganancia, esquemas de bombeo y diseños de cavidades. Los láseres de fibra ofrecen grandes ventajas sobre otros medios láseres como un menor tamaño, una alta fiabilidad junto a una larga vida operativa, o una excelente disipación del calor. Otras ventajas de este tipo de láseres son la ausencia de límites de ancho de banda, lo cual permite mayor eficiencia en el uso de la luz de bombeo, que presentan una excelente calidad de haz, así como una muy buena estabilidad de la temperatura.

En este apartado, centrándose en el proyecto realizado, se describe brevemente el efecto de amplificación óptica en general y de la emisión láser. De forma más detallada se explicará la amplificación en las fibras de sílice dopada con erbio, así como la amplificación Raman. También se explicará brevemente el artículo "*Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation based on DWDMs for sensing applications*", cuyo montaje es la base del inicio de este Trabajo Fin de Máster. Por último, para finalizar con el primer apartado, se describirán los objetivos del proyecto.

2.2. Amplificación óptica

La amplificación óptica se define como el proceso mediante el cual se incrementa la potencia de una señal óptica manteniendo el resto de sus características sin necesidad de reconversiones optoelectrónicas. Este efecto permite la compensación no solo de las pérdidas introducidas por la fibra en enlaces de larga distancia y gran capacidad, sino también de las debidas a otros elementos como los componentes pasivos que realizan tareas de división de señal.

La amplificación óptica puede conseguirse mediante inversión de población en un medio con bandas de energía intrínsecas, o bien mediante *scattering* en un medio no lineal. Al primer grupo pertenecen los amplificadores de semiconductor y los amplificadores de fibra dopada, mientras que al segundo pertenecen los amplificadores de efecto Raman.

2.2.1. Efecto Láser

Para tratar de comprender principio de funcionamiento del amplificador óptico es necesario recordar el efecto laser, y para ello los fundamentos de la interacción radiación-materia.

Consideremos un átomo con dos niveles de energía, E_1 y E_2 . Nos interesan las posibles formas de interacción entre el átomo y los fotones de una radiación de frecuencia ν , tal que $h\nu = E_2 - E_1$, es decir cuya energía es igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo. Las posibles formas de interacción son los procesos de emisión espontánea, absorción y emisión estimulada.

Emisión espontánea:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior, puede pasar espontáneamente al nivel inferior liberando su energía en forma de fotón. Dicho fotón tendrá una energía ($h\nu$) igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo.

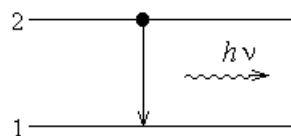


Figura 2.1: Fenómeno de emisión espontánea.

Absorción:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior e incide sobre él un fotón, éste puede ser absorbido por el material promocionando el átomo al nivel de energía superior. La absorción es una transición inducida por el fotón y que solamente puede producirse en presencia de éste.

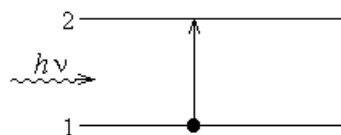


Figura 2.2: Fenómeno de absorción.

Emisión estimulada:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior y sobre él incide un fotón, el átomo puede ser estimulado por dicho fotón y emitir otro fotón con la misma dirección y sentido que el primero. El nuevo fotón presenta la misma frecuencia y fase que el original. Este proceso es inverso al de absorción y, al igual que éste, viene inducido por la radiación incidente.

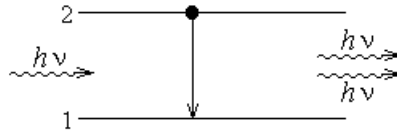


Figura 2.3: Fenómeno de emisión estimulada.

De estos tres procesos, los de absorción y emisión estimulada producen los fenómenos de atenuación y amplificación óptica. La emisión espontánea es la causante del ruido generado en los amplificadores ópticos.

En condiciones de equilibrio térmico los átomos tienden a adquirir los estados energéticos de menor energía, lo que significa que $N_2 \ll N_1$ y que predomina la absorción, traduciéndose en la atenuación de la señal óptica. Para obtener un medio amplificador es necesario que el número de átomos presentes en el estado de energía superior sea mayor que los presentes en el estado inferior. Esta condición se conoce como inversión de población y el proceso por el que se consigue se denomina bombeo.

2.2.2. Amplificadores de fibra dopada con Erbio

Los amplificadores de fibra dopada se obtienen al dopar el vidrio que constituye el núcleo de una fibra óptica con iones de materiales pertenecientes al grupo de las tierras raras (Er, Yb, Nd, Pr). El medio activo es el propio núcleo de la fibra óptica y la inversión de población se obtiene a través del bombeo óptico de dichos iones, que los traslada de un estado fundamental a otro excitado. La principal ventaja de este tipo de amplificadores es que son compatibles con la fibra óptica que constituye el medio de transmisión en los sistemas de comunicación ópticos.

El amplificador de fibra dopada con erbio es el más empleado de este tipo de dispositivos debido a que el diagrama de niveles de energía del erbio permite amplificar señales en la tercera ventana de comunicaciones ópticas.

Efecto láser en la fibra dopada con erbio

En una primera aproximación a los fenómenos presentes en la amplificación óptica consideramos el sistema simplificado de tres niveles de energía del ion de erbio.

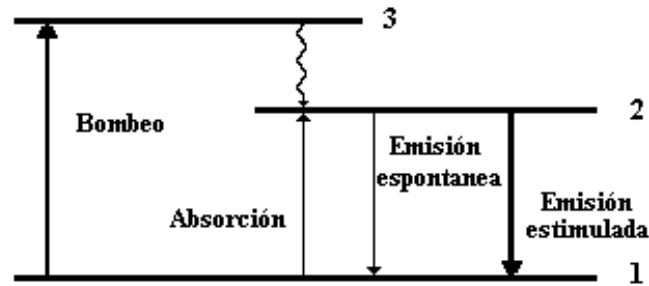


Figura 2.4. Fenómenos de iteración presentes en la fibra óptica

El nivel 1 es el nivel fundamental, el 2 es el nivel metaestable, que se caracteriza por un tiempo de vida largo (τ), y el nivel 3 es el nivel de bombeo. La transición láser de interés es la que tiene lugar entre los niveles 1 y 2.

Para conseguir la inversión de población entre los niveles 1 y 2, se utiliza un láser que emite a una longitud de onda igual a la diferencia de energía entre los niveles 1 y 3. Este láser, que se conoce como láser de bombeo, excita los iones desde el nivel 1 al 3 por absorción. El nivel 3 se caracteriza porque los electrones en él tienen un tiempo de vida medio muy corto, y además existe un mecanismo de transición de los electrones entre el nivel 3 y 2. Este decaimiento es no radiante, lo que significa que no se produce ningún fotón en dicho proceso, sino que la energía se libera en forma de fonón. Por el contrario, el nivel 2, se caracteriza por un tiempo de vida medio de los electrones en él mucho más largo ($\tau=10\sim12\text{ms}$), por lo que los electrones que decaen del nivel 3 se acumulan en el nivel 2, consiguiéndose el deseado efecto de inversión de población entre los niveles 1 y 2 con potencias de bombeo relativamente bajas.

Introduciendo potencia óptica de una frecuencia óptica correspondiente a la diferencia de energía entre los niveles metaestable y fundamental conseguimos que estos fotones exciten los electrones que se encuentran en el nivel 2 haciéndolos caer al nivel 1 por emisión estimulada, produciéndose fotones de las mismas características de los primeros y consiguiéndose la amplificación de la señal incidente.

Secciones eficaces

En el comportamiento del sistema láser desempeñan una importante función tanto la sección eficaz de emisión estimulada desde el primer estado excitado como la sección eficaz de absorción desde el estado fundamental. La probabilidad de que ocurra una transición de los electrones entre niveles de energía depende de la longitud de onda del fotón incidente, y las secciones eficaces de emisión y absorción proporcionan el perfil de probabilidades de que se produzca absorción o emisión estimulada en función de la longitud de onda del fotón incidente. La región donde ambas secciones eficaces toman valores relevantes se extiende aproximadamente desde 1450nm hasta 1650nm. Aunque el perfil de las secciones eficaces varía con la composición del vidrio, la posición de los picos de dichos espectros apenas se modifica. Dichos picos se sitúan en torno a 1530nm.

El espectro de ganancia de esta transición viene dado por las secciones eficaces de absorción y emisión y por la inversión de población de átomos en los niveles de energía, por lo que su perfil no es plano en longitudes de onda.

En torno a los 1480nm la absorción supera a la emisión lo que hace que esta zona bombeo sea adecuada para conseguir poblar el estado excitado. Además, en esta longitud de onda puede considerarse inexistente el efecto de absorción desde el estado excitado. El inconveniente de utilizar esta banda como banda de bombeo es que no se puede conseguir una inversión de población completa debido a la existencia de emisión espontánea para esta longitud de onda. Este inconveniente desaparece si empleamos la banda de absorción de 980nm al ser la emisión despreciable.

Si para provocar la inversión de población empleamos un láser de bombeo de 980nm, el esquema de bombeo es el correspondiente a uno de tres niveles como se ha descrito previamente. En el caso de utilizar un láser que emita a 1480nm, el sistema aparentemente responde a un sistema de dos niveles. En principio la amplificación no sería posible en un sistema de este tipo, sin embargo puede producirse dado que lo que tenemos en realidad son bandas de energía.

Al utilizar un láser de bombeo junto a fibra dopada con erbio el espectro de ganancia que se obtiene es el que se observa en la figura 2.5.

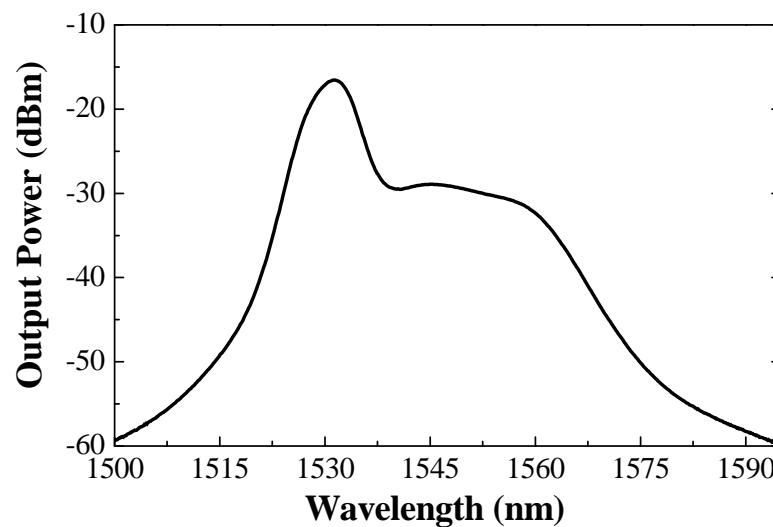


Figura 2.5. Curva ASE en fibra fuertemente dopada con erbio.

Saturación de la ganancia

La absorción del bombeo a lo largo de la fibra, la saturación de la ganancia producida por la señal incidente y la auto-saturación de la misma debido al ruido ASE, son factores que afectan a la

ganancia de un medio amplificador. La absorción del bombeo se puede contrarrestar aumentando la potencia de bombeo inyectada.

Cuando la potencia de señal introducida es elevada puede llegar el momento en que la tasa de emisión estimulada iguale e incluso supere a la tasa de bombeo, produciéndose la saturación de la ganancia. Para evitar este efecto podemos recurrir al aumento de la potencia de bombeo o a la disminución del nivel de potencia de señal inyectada. En ese caso estaremos trabajando en *régimen no saturado o de pequeña señal*.

El ruido ASE aumenta linealmente con la ganancia y puede llegar el momento en que éste compita con la tasa de bombeo cuando trabajamos en régimen de alta ganancia e inversión de población completa. Esta competición se produce en zonas localizadas cerca del final o del inicio de la fibra, donde los ruidos FASE y BASE son mayores respectivamente. En estas zonas el medio inversor se reduce y la ganancia del amplificador se satura en ausencia de señal de entrada.

Competencia por la ganancia

La ganancia proporcionada por un determinado segmento de fibra amplificadora con una potencia de bombeo constante tiene que repartirse entre las longitudes de onda presentes a su entrada. Esto se debe a que los átomos de la capa superior, conseguidos por la inversión de población mediante la potencia de bombeo, han de ser compartidos por todas las señales incidentes.

Este efecto es importante en sistemas de múltiples canales y debe considerarse a la hora de introducir nuevos canales o de eliminar algunos de los ya existentes. El añadir nuevos canales implica la disminución de la ganancia de los ya existentes, lo que puede originar problemas en el balance de potencia del sistema y en la calidad de la señal resultante tras la detección. Al eliminar canales aumentamos la potencia de los restantes, lo que puede causar problemas de saturación del sistema de detección o de no linealidad de la fibra.

2.2.3. Amplificación Raman

La amplificación Raman está basada en la dispersión Raman. Un fotón incide sobre el material de la fibra óptica absorbiendo parte de la energía, lo que causa una vibración o rotación y provoca que la luz existente se radie en todas las direcciones. Esta luz radiada será de menor energía que la luz incidente y por tanto su longitud de onda será mayor, de modo que se trata de un efecto inelástico.

Para conseguir este efecto de forma estimulada se radian dos ondas incidentes, siendo una de ellas a la longitud de onda de Stokes. Se conoce como longitud de onda de Stokes a aquella longitud de onda de bombeo que produce amplificación en la longitud de onda de la otra onda incidente en el centro de dispersión. De este modo las señales radiadas al chocar con el centro de dispersión *scattering*, imperfecciones en la fibra, provocan que todas las ondas dispersadas estén en fase.

Este efecto de amplificación presenta una curva de ganancia característica como la ilustrada en la figura 2.6.

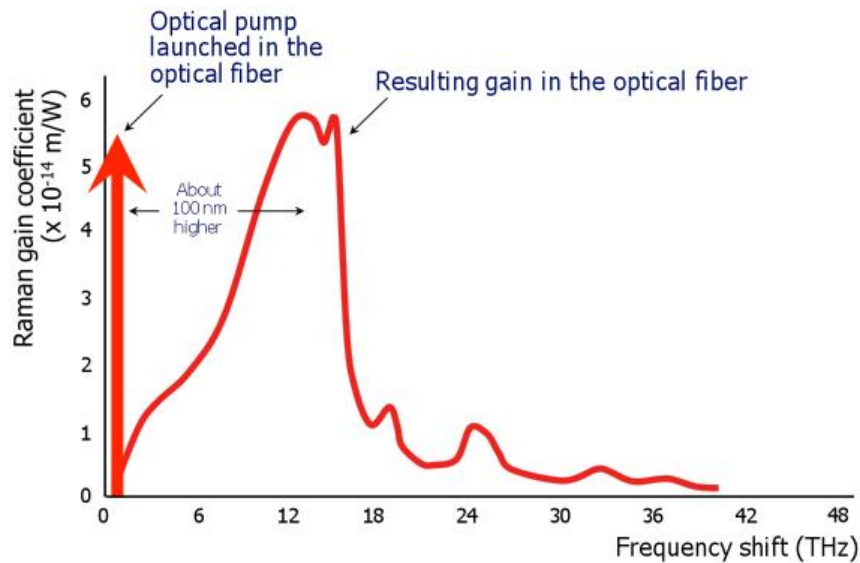


Figura 2.6: Perfil de ganancia Raman en sílice para una única de bombeo

Como se puede observar en la figura 2.6, el máximo de ganancia Raman se da a 13,2THz de distancia de la longitud de onda de bombeo, es decir, en torno a los 100nm por encima de la longitud de bombeo para un bombeo a 1445nm. De este modo, con una elección apropiada de la longitud de onda del bombeo, se puede amplificar señales de cualquier longitud de onda. Esta curva de ganancia tiene una anchura espectral (BW_{FWHM}) de 17,5THz.

La señal y el bombeo se encuentran en el centro de dispersión, donde se generan fotones extra a la longitud de onda de la señal y que viajarán en fase con ésta, tanto en el sentido de la señal como en sentido contrario, este efecto es el que genera el ruido de “backscattering”. Al llegar al siguiente centro de dispersión, la señal con el fotón extra y el bombeo vuelven a generar otros nuevos fotones de longitud de onda la de la señal y en fase con ésta. A su vez algunos fotones se propagarán en sentido contrario, agregándose al ruido de “backscattering” ya existente. Y este proceso se repite continuamente. Cualquier pequeña discontinuidad de la fibra puede convertirse en un centro de dispersión.

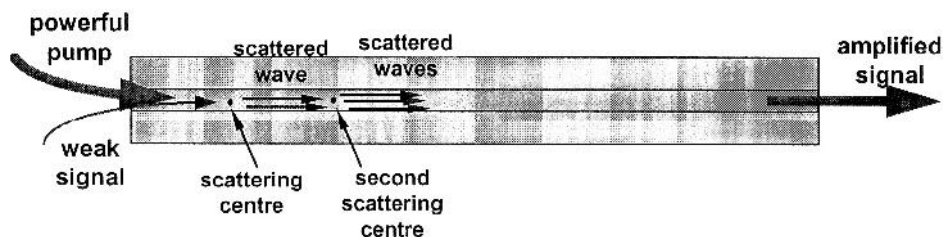


Figura 2.7: Amplificación Raman en el interior de la fibra

La ganancia Raman es máxima cuando la señal y el bombeo tienen polarizaciones paralelas, y es mínima, llegando incluso a anularse, cuando la polarización de ambas es ortogonal. Controlar la polarización a lo largo de toda la fibra es muy complicado, por lo que se suele optar por introducir a ambas señales una polarización aleatoria, de manera que pese a que no se conseguirá la máxima ganancia posible, tampoco existirán puntos donde la ganancia Raman sea nula. Se estará en un caso intermedio donde la ganancia Raman obtenida será la mitad de la ganancia máxima posible.

La amplificación Raman, como todo sistema de amplificación, no es perfecto. De modo que existirá un ruido asociado a la amplificación. La señal que se desea amplificar será una señal de banda ancha, y en muchos casos estará modulada, de modo que se tendrá ruido debido a la amplificación Raman espontánea, que al interactuar con la señal de bombeo se amplificará. Se conoce como “*Backward ASS (Backward Amplified Spontaneous Scattering)*” y “*Forward ASS (Forward Amplified Spontaneous Scattering)*”, según el sentido de propagación del ruido. Es lo que en la amplificación mediante fibra dopada con erbio se conoce como ruido ASE. Este ruido es incoherente, sin polarización concreta y de banda ancha.

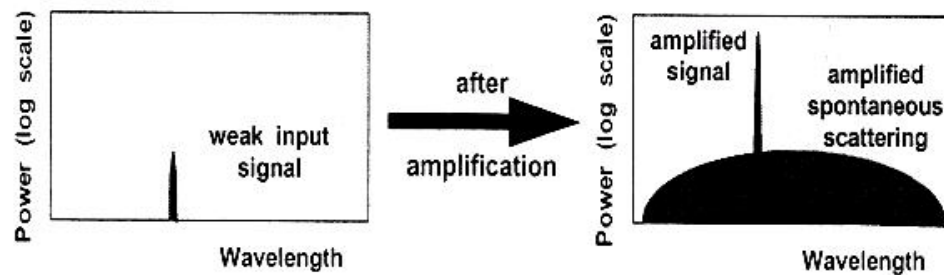


Figura 2.8: Ruido ASS añadido a una señal

Aplicación de la amplificación Raman

Como ya se ha visto, para amplificar la longitud de onda deseada, basta con elegir la longitud de onda de bombeo adecuada. Pero además de esto, existe la posibilidad de hacer variar la curva de ganancia Raman mediante la introducción de varias longitudes de onda de bombeo. Esta aplicación es muy interesante, ya que podríamos conseguir aplanar la curva de ganancia con las ventajas que esto conlleva.

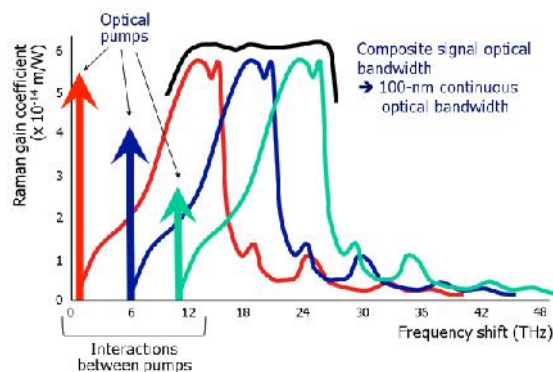


Figura 2.9: Perfil de ganancia Raman al introducir varias longitudes de onda de bombeo.

La ganancia Raman a lo largo de la fibra óptica

El efecto Raman es un efecto no lineal, de modo que la ganancia Raman no será una ganancia lineal. Por ejemplo, para un tramo de 50km de SMF si se calcula de forma teórica la potencia necesaria para tener transparencia, se obtiene que ésta es de 416mW.

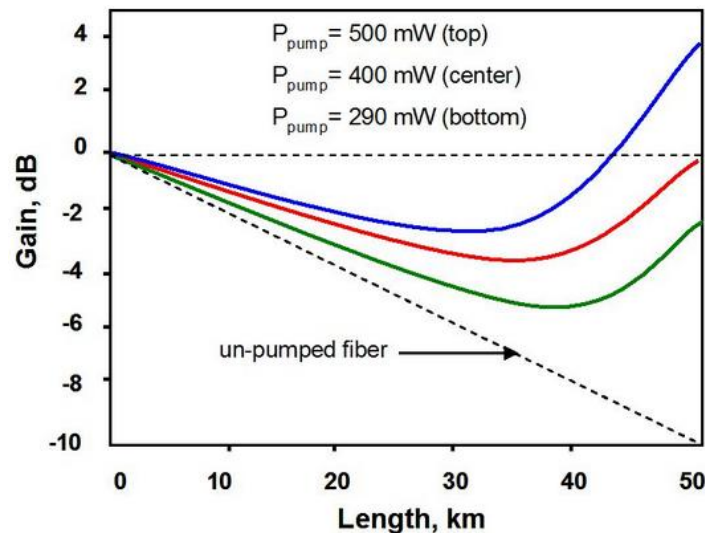


Figura 2.10: Ganancia Raman frente a la distancia

Se puede observar como el aumento de la ganancia es mucho mayor al final del tramo de fibra. Es importante darse cuenta de que si se disminuye la distancia del tramo será necesario el aumento de la potencia de bombeo para conseguir la misma ganancia. Este efecto tendrá su límite, ya que existe una distancia mínima que es necesaria para obtener una ganancia Raman apreciable con unas potencias lógicas. Esto lleva a la conclusión de que la amplificación Raman es muy útil cuando las distancias son grandes.

De la figura 2.10 se deduce también que con amplificación Raman la transparencia sólo se garantiza en un punto del bus, es decir, exigiendo transparencia en el receptor, no se garantiza transparencia al final del bus.

2.3. Láseres de fibra

Los láseres de fibra se comportan como estructuras de guía-onda que pueden tener altas densidades de potencia en el núcleo. Al estar basados en fibra óptica tienen todas las ventajas que la tecnología permite: bajas pérdidas por dispersión, bajas absorciones no deseadas, pocas imperfecciones del material. Permiten un buen solapamiento entre las ondas guiadas del bombeo y de emisión láser cuando se utilizan fibras monomodo en ambas longitudes de onda. Las fibras ópticas presentan una relación entre superficie y volumen alta que permite una buena disipación del calor.

Los factores anteriormente citados, así como su geometría cilíndrica, hacen de los láseres de fibra dispositivos idóneos para aplicaciones médicas, así como para sistemas de transmisión con alta eficiencia de acoplo operando con bajos niveles de potencia de bombeo.

Los diferentes diseños de láseres de fibra permiten obtener anchuras de línea muy estrechas y longitudes de onda sintonizables, operando con una potencia umbral de bombeo baja. La longitud de onda de emisión láser viene determinada por el dopante y su característica espectral, por lo que variando tanto la composición como la densidad de dopaje se podrá modificar el espectro de emisión del láser.

La estructura básica de un láser de fibra se muestra en la figura 1.16.

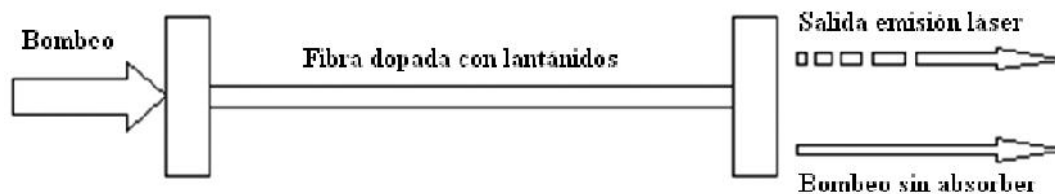


Figura 2.11: Estructura básica de un láser de fibra

Se sitúa una fibra óptica dopada con algún tipo de iones de tierra rara entre dos espejos cuidadosamente seleccionados. A través del espejo de la izquierda se introduce luz de un láser de bombeo, y a través del espejo de la derecha se extrae la luz de salida. El láser de fibra es un dispositivo de guía-onda resonante en el que el guiado se realiza en la fibra y la resonancia se obtiene por medio de los dos espejos, lo que equivale a una estructura Fabry Perot.

Los láseres de fibra pueden verse como un conversor de longitud de onda. Los fotones a la longitud de onda de bombeo son absorbidos, produciendo la inversión de población y la emisión estimulada necesaria para que se produzca la emisión láser en la longitud de onda característica determinada por el dopante de la fibra y las características de la cavidad resonante.

2.4. Láseres de fibra dopada con Erblio con configuración en anillo

La generación de luz láser se consigue introduciendo un medio amplificador en una cavidad. Dicha cavidad cumple dos funciones, por un lado confina la potencia debido a la emisión estimulada de modo que la señal atraviese múltiples veces el medio amplificador y, por otro, determina las frecuencias ópticas de emisión del láser. Hay que tener en cuenta que el origen de la emisión de luz láser se encuentra en la emisión espontánea que produce el medio activo, la cual se amplifica por emisión estimulada en los sucesivos pasos por dicho medio.

El uso de configuraciones en anillo permite la operación de un láser sin espejos. Los sucesivos pasos por el medio amplificador se consiguen por recirculación a lo largo del anillo. Si el láser en anillo es de fibra, todos sus componentes (medio activo, elementos selectores de longitud de onda, etc.) quedan integrados en la cavidad. La salida del láser se realiza a través de un acoplador.

En la fibra de sílice dopada con erbio la amplificación se produce en una banda ancha de frecuencias ópticas dentro de la tercera ventana de comunicaciones. Por ello, puede conseguirse emisión láser en un intervalo amplio de longitudes de onda (desde 1520nm hasta 1580nm). La longitud de onda de emisión del láser puede seleccionarse mediante el uso en el interior de la cavidad de una amplia variedad de filtros ópticos: Fabry-Perot, acusto-ópticos, AWG o redes Bragg (FBG) entre otros.

La configuración básica del láser de fibra se presenta a continuación:

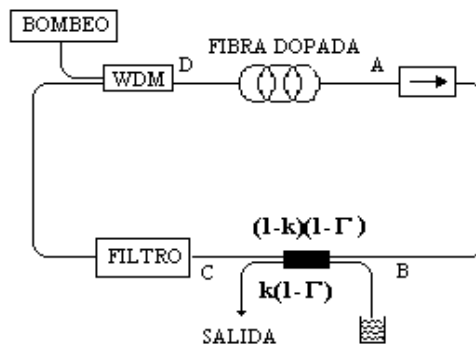


Figura 2.12: Esquema de un láser de anillo de fibra dopada con erbio

La potencia de bombeo a 980nm se acopla al anillo mediante un multiplexor en longitud de onda. Para la selección de la longitud de onda de trabajo del láser, se utiliza un filtro en frecuencia óptica. Por último, un acoplador sirve para obtener la salida láser.

A veces se incluye un aislador para eliminar la onda que se propaga en sentido contrario por el anillo para evitar el fenómeno conocido como “*spatial hole burning*”. Si dos señales con igual longitud de onda se propagaran por el anillo en sentidos opuestos, se producirá, al superponerse ambas, un patrón de interferencia dando lugar a la formación de una onda estacionaria. En esta

situación, en un láser de fibra óptica bombeado con una potencia muy superior a la potencia umbral se tendría que la inversión de población se “consumiría” principalmente en los antinodos teniéndose en ellos amplificación mientras que en los nodos se acumularía una fuerte inversión de población. Este fenómeno sería el causante de salto de modos en la cavidad y por tanto, el responsable de inestabilidades en la longitud de onda de funcionamiento del láser y en consecuencia, de un aumento en la anchura de línea del láser. En el diseño del láser, deben considerarse las pérdidas de la cavidad y la relación de acoplo para optimizar el funcionamiento del sistema.

Para valores altos de la relación de acoplo, se obtienen potencias de salida elevadas. En esta situación, debido a que se extrae mucha potencia de la cavidad, llega poca potencia a la fibra dopada. La ganancia proporcionada por ésta, es mayor cuanto menor es la potencia a su entrada por lo que con tasas de acoplo elevadas, se consigue una alta eficiencia. Sin embargo, la ganancia que puede proporcionar un tramo de fibra dopada no es infinita por lo que existe un valor óptimo de k por encima del cual la ganancia de la fibra dopada no es suficiente para superar las pérdidas de la cavidad.

Todas las pérdidas en la cavidad hacen que disminuya la potencia de salida del láser. Es importante la localización, dentro de la cavidad, de los componentes que introducen pérdidas. Si éstos se encuentran entre el acoplador de salida y la fibra dopada, el efecto de las pérdidas será compensado, en parte por una mayor ganancia en la fibra dopada (siempre que se trabaje con ganancias inferiores a la de saturación de la fibra). Sin embargo, si se producen entre los puntos A y B de la figura 2.12, afectan directamente a la salida, reduciendo la potencia del láser. Por tanto, hay que minimizar las pérdidas totales de la cavidad, especialmente las que se producen entre la salida de la fibra dopada y el acoplador de salida, para conseguir potencias de salida elevadas con bajos valores de potencia de bombeo umbral.

CAPÍTULO III Estado del arte y objetivos

3.1. Estado del arte de láseres de fibra óptica

3.1.1. Introducción

Desde su desarrollo en los años 60 hasta nuestros días, los láseres de fibra óptica han ido incrementando su importancia en diversos ámbitos de nuestra vida. Ya sea en la medicina, en la electrónica de consumo o en la industria, las mejoras introducidas por este tipo de láseres los han hecho ser considerados como una de las principales líneas de investigación en nuestros días. Los láseres de fibra óptica aportan frente a otros láseres una serie de ventajas tanto económicas como técnicas para su aplicación industrial. Las características técnicas que los hacen competitivos son su menor tamaño, su mayor eficiencia y la simplicidad de sus sistemas de enfriamiento [1].

Como ya se ha citado anteriormente, un láser de fibra óptica es un dispositivo en el que el medio activo que proporciona la ganancia es habitualmente una fibra óptica dopada con algún tipo de elemento de las denominadas tierras raras. Las más usadas son el erbio (Er^{3+}) [2], el neodimio (Nd^{3+}), el yterbio (Yb^{3+}), el tulio (Tm^{3+}), o el praseodimio (Pr^{3+}). Todos estos elementos usados como dopantes en el interior de una fibra óptica sirven para realizar amplificadores de fibra dopada, que son los elementos esenciales de un láser de fibra.

Existen igualmente una serie de efectos no lineales tales como la dispersión estimulada Raman (stimulated Raman scattering), la amplificación estimulada Brillouin (stimulated Brillouin scattering) o el mezclado de cuatro ondas (four-wave mixing) que pueden también proporcionar ganancia en una fibra óptica sin necesidad de usar dopantes y, de ese modo, servir como medio de ganancia para un láser de fibra óptica. Los láseres de fibra óptica pueden usarse bien para generar radiación de onda continua (CW) o como generadores de pulsos ópticos ultracortos.

Los láseres de fibra óptica suponen una innovación tecnológica muy importante que está pasando rápidamente de los laboratorios de investigación a distintas aplicaciones en la industria, gracias a los numerosos productos ya comercializados.

Estos dispositivos representan una nueva generación de láseres relativamente compactos, es decir, de menor peso y tamaño que los convencionales; además, puede alcanzar niveles de potencia de decenas, centenas e incluso miles de vatios. Las aplicaciones de láseres con tal potencia son muy variadas, incluyendo procesos industriales, mecanizado de piezas, soldadura, medida remota y control de contaminantes en la atmósfera (monitorización ambiental) [3].

3.1.2. Principio de funcionamiento

Los láseres, ya sean de gas o de estado sólido necesitan un medio que proporcione ganancia a las longitudes de onda que se pretenden emitir y una realimentación y filtrado selectivo en longitud de onda que favorezca la emisión estimulada frente a la emisión espontánea.

Para realizar esta realimentación selectiva en longitud de onda se utilizan configuraciones ópticas que van desde la pareja de espejos que forman un resonador Fabry-Perot a estructuras más

sofisticadas realizadas en semiconductor o con fibras ópticas. En cualquier caso y por costumbre, todas estas estructuras reciben el nombre de cavidades, aunque sean bien sólidas.

Los láseres de fibra soportan normalmente un buen número de modos de resonancia longitudinales dentro de su cavidad debido al gran ancho de banda de la ganancia espectral de la amplificación en fibra óptica (>30 nm) y al relativamente pequeño espaciado entre estos modos (< 100 MHz). El ancho de banda espectral de salida de un láser puede superar los 10 nm funcionando en modo de onda continua.

Algunas aplicaciones de estos láseres requieren una operación de ancho de línea muy estrecha y con un único modo cuya longitud de onda pueda ser sintonizada sobre el ancho de banda.

Se han utilizado diversos métodos para realizar láseres de fibra óptica con un ancho de línea suficientemente estrecho para aplicaciones como las telecomunicaciones. De entre ellos, las redes de difracción de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG) son los componentes preferidos para este propósito, dado que pueden fabricarse con un espectro de reflectividad de menos de 0.1 nm. Resulta también interesante destacar que el gran ancho de banda de estos láseres de fibra óptica es muy útil para sintonizarlos sobre un rango de longitudes de onda superior a los 50 nm [4], [5].

Los láseres que emiten múltiples longitudes de onda resultan de gran interés en el ámbito de las telecomunicaciones y la multiplexación de sensores. Estos láseres tienen además un gran potencial para caracterizar fibras ópticas y componentes para la multiplexación en longitud de onda (WDM). Las características deseables de estas fuentes ópticas serían las siguientes: se necesita un gran número de canales sobre un rango ancho de longitudes de onda, potencias de salida moderadas (del orden de 100 μ W por canal) con una buena relación de señal a ruido óptica (OSNR- por sus siglas en inglés), una buena ecualización en potencia entre las líneas emitidos, una operación de un único modo longitudinal para cada línea de emisión láser, que sean sintonizables y que tengan una posición apropiada en la parrilla de frecuencias de la ITU.

Los láseres de fibra cubren gran parte de estos requisitos como fuentes de emisión multilínea. Su fácil fabricación ha dado lugar a muchos diseños avanzados. El principal desafío en la realización de un láser de emisión multilínea usando fibra dopada con tierras raras es el hecho de que los iones de dichos materiales se saturan prácticamente de forma homogénea a temperatura ambiente, impidiendo una operación multilínea estable.

El término “láseres de fibra óptica” normalmente hace referencia a láseres que utilizan la fibra óptica como medio de ganancia, aunque algunos láseres que emplean un amplificador óptico de semiconductor y un resonador de fibra han sido catalogados también como láseres de fibra (o láseres de fibra/ semiconductor). En la mayoría de los casos y como ya se ha comentado con anterioridad, este medio de ganancia es una fibra dopada con iones de tierras raras y uno o varios diodos láser que se utilizan como bombeo óptico [6].

Como es bien sabido, el término *láser* significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación y consta de una fuente óptica con una cavidad por la que sale un haz de luz

monocromático y muy directivo. La principal característica de dicho haz es la de ser altamente coherente lo que permite en ciertas aplicaciones focalizar una gran cantidad de potencia óptica por unidad de superficie.

Por otro lado, las fibras ópticas han proporcionado un notable impulso al desarrollo de las telecomunicaciones durante las últimas cuatro décadas. Para ello, se han creado una serie de dispositivos adicionales, muchos de ellos fabricados también con fibras ópticas; como acopladores, filtros y amplificadores. Estos dispositivos son intrínsecamente de bajas pérdidas y pueden interconectarse fácilmente dentro de las redes de telecomunicación [7].

La importancia de los sistemas de fibra óptica con multiplexación en longitud de onda (WDM) ha crecido exponencialmente durante la primera década de este siglo. La técnica de multiplexación en longitud de onda se utiliza tanto en telecomunicaciones como en redes de multiplexación de sensores. Para los sistemas WDM se necesita generar múltiples portadoras ópticas, que permiten el incremento de la capacidad del sistema de una forma eficiente y económica. Los láseres de fibra óptica son especialmente apropiados para este tipo de sistemas, especialmente para multiplexar sensores de fibra óptica.

Como se ha comentado con anterioridad, un dispositivo clave fabricado con fibra óptica es la red de difracción de Bragg o FBG, que puede usarse para reflejar o filtrar luz en el propio núcleo de la fibra, evitando la necesidad de utilizar componentes externos de óptica de volumen, disminuyendo con esto pérdidas de potencia óptica.

Una red de Bragg consiste de una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, por lo general monomodo [7].

En un FBG la longitud de onda de la luz que es reflejada viene dada por la siguiente ecuación:

$$\lambda_{Bragg} = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo de la red de difracción. En la ecuación anterior se puede ver que la longitud de onda de Bragg puede variar con un cambio en el periodo de la red de difracción o del índice de refracción efectivo. El primero sería el caso de una variación de tensión y el segundo de una modificación en la temperatura. Es por este motivo que los FBGs se utilizan habitualmente como sensores de estos dos parámetros.

Son ideales para un amplio rango de aplicaciones siendo un elemento clave en el campo de las comunicaciones ópticas y como sensores de fibra óptica, además de tener aplicaciones en láseres de fibra óptica [8].

3.1.3. Diseño de láseres de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica pueden diseñarse usando una gran cantidad de alternativas de cavidad láser [4]. Como se ha mencionado, uno de los tipos más sencillos de cavidad láser es la

llamada cavidad Fabry-Perot, que puede realizarse situando la fibra óptica amplificadora entre dos espejos de alta reflectividad. En el caso de los láseres de fibra, los espejos a menudo se sitúan en el extremo final de las fibras para así evitar las pérdidas de difracción.

Uno de los láseres de fibra óptica más utilizados hoy en día es el láser de fibra dopada con erbio (EDFLs) ya que pueden operar en varias regiones de longitudes de onda que van desde el visible hasta el infrarrojo lejano. Resulta de particular interés la región situada en torno a los 1.55 μm dado que coincide con la zona de bajas pérdidas de las fibras de sílice utilizadas en las comunicaciones ópticas y en la multiplexación de sensores de fibra.

Para conseguir la ganancia en estos láseres se emplean amplificadores de fibra dopada con erbio que consisten en una fibra cuyo núcleo ha sido dopado con iones Er^{3+} y que, con un bombeo apropiado, dichos iones pueden conseguir que la fibra alcance una ganancia óptica gracias a la emisión estimulada. En términos muy simplificados, el principio de operación es el siguiente: cuando el ión de Er^{3+} es introducido en el material, tiene una energía de base de E_1 , la energía más baja posible para el ión de Er^{3+} (ver Figura 3.1.1). Existen dos niveles de energía convenientes para bombear ópticamente el ión de Er^{3+} . El primero es E_2 y el segundo E_3 está aproximadamente 1.27 eV por encima del nivel de energía de base.

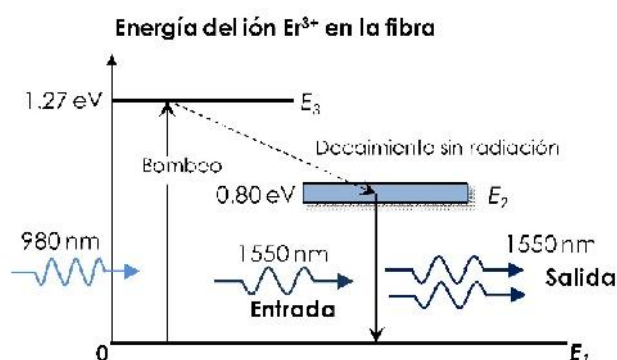


Figura 3.1.1.: Diagrama de los niveles de energía de un ión de Er^{3+} y amplificación mediante bombeo de E_1 a E_3 , obteniendo emisión estimulada desde E_2 hasta E_1 . La línea discontinua indica transiciones sin radiación.

Estos dos niveles corresponden a las longitudes de onda de 0.98 y 1.48 μm . De hecho, se han desarrollado láseres de semiconductor que operan en estas longitudes de onda con el único propósito de servir como bombeo de las fibras dopadas con erbio. Su uso ha dado lugar a una gran variedad de láseres de fibra comerciales que emiten en la zona de los 1.55 μm .

Introduciendo potencia óptica “de bombeo” en la fibra dopada a cualquiera de estas longitudes de onda se consigue la inversión de población entre los niveles E_1 y E_2 . Por ejemplo, al bombear a 0.98 μm (Figura 3.1.1) los electrones del nivel E_1 promocionan al nivel E_3 y desde ahí a una banda de energía intermedia E_2 . Este paso se realiza mediante una transición que no produce fotones y el tiempo de vida medio de los electrones en este nivel es de unos 10 ms.

De este modo, más y más electrones se acumulan en E_2 , que se encuentra a 0.8 eV por encima del nivel base de energía E_1 . La acumulación de electrones en E_2 conlleva la inversión de población entre E_2 y E_1 . La diferencia de niveles de energía $\Delta E = E_2 - E_1 = 0.80$ eV corresponde con longitudes de onda de la banda de 1550 nm, por lo que al alcanzar la inversión de población tendremos ganancia por emisión estimulada en este rango de longitudes de onda.

Este amplificador óptico, dentro de la cavidad del láser de fibra, comenzará generando inicialmente fotones por emisión espontánea dentro de la banda de amplificación del Erblio. Posteriormente, y ya por emisión estimulada, generará una emisión láser a las longitudes de onda que vengán forzadas por la cavidad.

Por otro lado, dependiendo de las características del bombeo que se aplique, se puede obtener una emisión de luz continua (continuous wave, CW) o pulsada mediante las técnicas de conmutación de la ganancia, o la de “mode locking”; o mediante la colocación de un absorbente saturable a la salida.

La siguiente figura (Figura 3.1.2) muestra un ejemplo de una configuración básica de un láser de fibra óptica dopada. La luz de “bombeo” es introducida desde el extremo izquierdo a través de un espejo hasta el núcleo de la fibra dopada. La luz láser generada se extrae a través del extremo derecho del montaje.



Figura 3.1.2.: Configuración básica de un láser de fibra óptica.

Existen varias alternativas para evitar que la luz del bombeo pase a través de los espejos dieléctricos. Por ejemplo, una posibilidad podría ser aprovechar las ventajas de los acopladores de fibra. Es posible diseñar un acoplador de fibra tal que la mayor parte de la potencia de bombeo llegue a la fibra dopada sin sufrir la atenuación de un espejo. Dichos acopladores se conocen como acopladores de multiplexación en longitud de onda (WDM). Otra solución es la de usar redes de Bragg de fibra óptica como espejos [9]. Como es bien sabido, una red de Bragg puede actuar como un espejo de alta reflectividad para la longitud de onda del láser al mismo tiempo que es transparente al bombeo. El uso de dos de estas redes de difracción daría también lugar a una cavidad Fabry-Perot todo-fibra [10]. Una ventaja adicional de las redes de Bragg es que el láser puede ser forzado a operar con un único modo longitudinal [11]. Una tercera propuesta hace uso de cavidades en anillo de fibra óptica en combinación o no con redes Bragg [12].

Estas cavidades se utilizan normalmente para obtener un comportamiento unidireccional del láser. En el caso de los láseres de fibra óptica, una ventaja adicional es que una cavidad en anillo se realiza si usar espejos.

En el diseño más simple, dos puertos de un acoplador se conectan de manera que formen una cavidad láser en anillo al incluir a la fibra dopada entre una entrada y una salida del acoplador, como se puede ver en el esquema de la Figura 3.1.3.

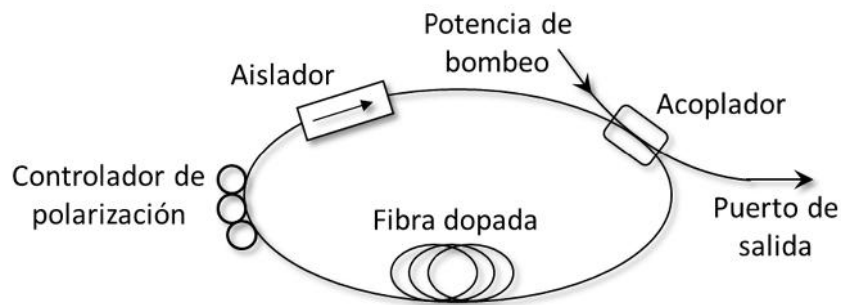


Figura 3.1.3.: Esquema de una cavidad unidireccional de fibra óptica en anillo para láseres de fibra.

Para asegurar un funcionamiento unidireccional, se puede utilizar un aislador dentro del lazo de fibra. Sin embargo, se han realizado varias configuraciones alternativas de láseres de fibra óptica, donde los acopladores pueden eliminarse de la cavidad en anillo mediante el uso de circuladores [11], [13].

En teoría también sería necesario algún dispositivo para controlar la polarización de la luz que circula por el anillo de fibra óptica como por ejemplo un controlador de polarización. Este controlador de polarización proporciona un mecanismo dentro de la cavidad para compensar la dependencia entre la polarización y la ganancia. Sin embargo, algunos trabajos previos [13] han demostrado que, en la práctica, este elemento posee una influencia mínima en el caso de tener un láser en régimen multimodo.

Son posibles otros muchos diseños de cavidades de fibra óptica. Por ejemplo, utilizando dos cavidades Fabry-Perot acopladas. En el esquema más simple, uno de los espejos se separa del final de la fibra una distancia determinada. La reflectividad del 4% de las transiciones fibra-aire actúa como un espejo de baja reflectividad que acopla la cavidad de fibra con el espejo separado por aire que a su vez forma una segunda cavidad. Normalmente no se desea generar una segunda cavidad, y por este motivo, todas las terminaciones de fibra del sistema que no se usan tienen que ir inmersas en un gel adaptador de índice para evitar reflexiones indeseadas.

La siguiente figura (Figura 3.1.4) muestra el desarrollo experimental de un láser de fibra óptica obteniéndose en este caso, 3 emisiones láser simultáneamente.



Figura 3.1.4.: Caracterización de un láser en anillo multilinea de fibra óptica.

Muchos láseres presentan fluctuaciones en la intensidad de su potencia de salida que aparece bien como una secuencia de pulsos estrechos o como un pequeño rizado superpuesto sobre la señal de salida del láser de onda continua.

Se ha demostrado que estas inestabilidades pueden degradar significativamente las características de funcionamiento de los sistemas láser de fibra óptica. Se ha llevado a cabo diferentes estudios de sus posibles causas. Los principales motivos que influyen en la estabilidad son: la potencia de bombeo [14], la longitud de la fibra dopada [15], el factor de acoplo utilizado [16], la longitud total de la cavidad [15], las pérdidas en la cavidad [17] así como la influencia de efectos tales como el llamado efecto “spectral hole-burning” [18]. Sin embargo, otros factores como por ejemplo el control de la polarización [15], no parecen tener un gran efecto sobre dichas inestabilidades como ya se ha comentado con anterioridad.

Como muestra del interés despertado por este tipo de dispositivos, la Figura 3.1.5 muestra la evolución del número de publicaciones en revistas y congresos científicos relacionados con este tipo de láseres, mostrando una clara tendencia de subida desde 1970 hasta el año 2013. Del mismo modo, la Figura 3.1.6 muestra el porcentaje de publicaciones relacionadas con estos láseres desde su aparición, distribuida por países.

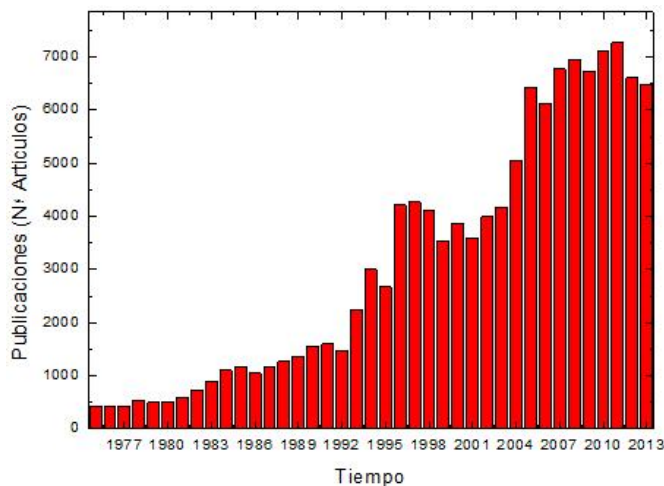


Figura 3.1.5.: Gráfico de la evolución del N° de publicaciones sobre láseres de fibra óptica



Figura 3.1.6.: Evolución del número de publicaciones en revistas y congresos científicos relacionadas con los láseres de fibra óptica desde su aparición hasta el año 2008. (Fuente: www.scopus.com)

Cabe destacar el aumento de publicaciones dentro de este campo de investigación en los últimos años debido, en gran medida, a la cada vez mayor aplicabilidad de estas técnicas en diferentes ámbitos como la medicina o la industria entre otros

3.1.4. Aplicaciones

Desde que se empezaron a comercializar en la década pasada, este tipo de láseres se han vuelto omnipresentes. Se pueden encontrar en decenas de aplicaciones en muchos sectores de la sociedad actual. Estas incluyen campos tan dispares como la electrónica de consumo, las tecnologías de la información, caracterización de componentes y materiales en ciencia, métodos de diagnóstico en medicina, así como el mecanizado, soldadura o sistemas de corte en sectores industriales y militares.

El continuo aumento de la potencia de salida de estos láseres está abriendo una gran cantidad de nuevas aplicaciones para muchos de ellos, los cuales empezaron con unas potencias de salida de decenas de vatios y ahora pueden alcanzar varios kilovatios. En un principio, estos láseres se comercializaron para la industria de las telecomunicaciones y después fueron integrándose en el campo de aplicaciones como la soldadura y corte de materiales a medida que su potencia de salida iba incrementando [19].

En muchas de estas aplicaciones, los beneficios de los láseres se deben a sus propiedades físicas. Por ejemplo, un haz láser altamente coherente puede enfocarse por debajo de su límite de difracción que, a longitudes de onda visibles, corresponde solamente a unos pocos nanómetros. Cuando se enfoca un haz de un láser potente sobre un punto, éste recibe una enorme densidad de energía. Esta propiedad permite al láser grabar gigabytes de información al realizar cavidades

microscópicas en un CD, DVD o Blu-ray. También permite a un láser de media o baja potencia alcanzar intensidades muy altas y usarlo para cortar, quemar o incluso sublimar materiales.

- A continuación se enumeran algunas de las ventajas de los láseres de fibra óptica frente a otros tipos de láseres:
- La luz sale por una fibra flexible: el hecho de que la luz se genere y salga del láser por una fibra permite desarrollar fácilmente un elemento de enfoque móvil. Esto resulta interesante para láseres de corte de metales o telas, soldadura o grabado de metales y polímeros.
- Alta potencia de salida: los láseres de fibra pueden tener regiones activas de varios kilómetros de largo, y así producir y soportar unas ganancias y potencias ópticas muy altas. Los niveles de potencia de salida continua pueden ser de kilovatios dado la buena relación entre el volumen y el área superficial de la fibra, lo que permite un enfriamiento eficiente.
- Alta calidad óptica: las propiedades del guiado de la luz en las fibras reduce o elimina la distorsión térmica en el camino óptico, produciendo una difracción limitada, o un haz óptico de gran calidad.
- Tamaño compacto: aunque más voluminosos que los láseres de semiconductor, los láseres de fibra óptica son compactos comparados con los láseres de gas con unos niveles potencia comparable, dado que la fibra puede ser curvada y enrollada para así ahorrar espacio.
- Fiabilidad: los láseres de fibra muestran una alta estabilidad ante vibraciones, un largo tiempo de vida y una operación prácticamente libre de mantenimiento.

Como ya se ha señalado, estos láseres se utilizan en procesos de fabricación, para grabar o marcar metales, plásticos y vidrio. A modo de resumen se muestra un listado de otras aplicaciones de este tipo de láseres en la vida cotidiana:

- Medicina: Operaciones sin sangre, tratamientos quirúrgicos, ayudas a la cicatrización de heridas, tratamientos de piedras en el riñón, operaciones de vista, operaciones odontológicas.
- Industria: Cortado, guiado de maquinaria y robots de fabricación, mediciones de distancias precisas mediante láser.
- Defensa: Guiado misiles balísticos, alternativa al radar, cegado a las tropas enemigas.
- Ingeniería Civil: Guiado de máquinas tuneladoras en túneles, diferentes aplicaciones en la topografía como mediciones de distancias a lugares inaccesibles.
- Investigación: Espectroscopia, interferometría láser, LIDAR, telemetría.
- Desarrollos en productos comerciales: Impresoras láser, CD, lectores de código de barras, punteros láser, termómetros, hologramas, aplicaciones en iluminación de espectáculos.
- Tratamientos cosméticos y cirugía estética: Tratamientos de acné, celulitis, tratamiento de las estrías, depilación.

Los láseres de fibra óptica prometen alcanzar aún mayores niveles de potencia óptica, ya que la tecnología no está limitada por el diseño de las fibras ópticas, sino por la potencia disponible de bombeo con las agrupaciones de diodos láser de semiconductor. Por otro lado, es posible configurar los láseres de fibra óptica de forma Oscilador Maestro–Amplificador de Potencia (MOPA, por sus siglas en inglés), lo que permite obtener láseres de alta potencia y pulsados, con una duración de pulso de picosegundos (billonésima parte de un segundo) y femtosegundos (milbillonésima parte de un segundo). Se estima que con este tipo de configuración se pueden lograr potencias de hasta cien kilovatios [20].

3.1.5. Situación del mercado de los láseres de fibra óptica

Resumiendo, los mayores beneficios de la tecnología de los láseres de fibra óptica son los siguientes: una eficiencia mayor del 27%, una larga vida de los diodos de bombeo, un mantenimiento prácticamente gratuito, una misma unidad puede cortar, soldar o incluso taladrar, baja divergencia del rayo, y un relativo bajo coste. Estos láseres son compactos y transportables y ofrecen un óptimo funcionamiento ya que no requieren calentamiento, el tamaño del haz de salida con varía con la potencia y tiene un gran rango dinámico.

En la actualidad, cerca de 70 empresas de todo el mundo comercializan este tipo de láseres de fibra óptica. Las siguientes tablas (Tabla 1 y Tabla 2) muestran algunas de las principales características y posibles aplicaciones tanto para los láseres pulsados como para los de onda continua así como algunas de las empresas que los distribuyen.

LASERES DE FIBRA OPTICA PULSADOS

| Material | Longitud de onda (nm) | Potencia máxima | Aplicaciones | Empresas |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|--|--------------------|
| Erbio (fibra dopada) | 1055-1090 | 18W | Aviación/Automoción Medicina/Biomedicina Investigación de materiales | Rofin-Baasel Inc |
| | 1525-1565 | 1-10nJ | Comunicaciones Medicina/Biomedicina | Calmar Optcom Inc |
| | 1530-1565 | 1W | Control de calidad Procesado e investigación de materiales | Calmar Optcom Inc |
| | 1550-1580 | | Sensado remoto Comunicaciones | PolarOnyx Inc |
| Yterbio (fibra dopada) | 1030-1040 | 300W | Procesado de silicio Taladrado de materiales Grabado de materiales | EOLITE Systems |
| | 1030-1070 | 10W | Micro-mecanizado Corte de polímeros y silicio | IPG Photonics Corp |
| | 1030-1080 | | Sensado remoto Comunicaciones | PolarOnyx Inc |
| | 1050-1090 | 5W | Comunicaciones Procesado de semiconductores | Nufern |
| | 1060-1090 | 10W | Comunicaciones Procesado de semiconductores | Nufern |
| Yterbio (glass) | 1020-1080 | 1-10nJ | Control de calidad Sensado remoto | Calmar Optcom Inc |

Tabla 1.: Resumen de la oferta comercial de láseres pulsados de fibra óptica.

| LASERES DE FIBRA OPTICA DE ONDA CONTINUA | | | | |
|--|-----------------------|-----------------|---|--------------------|
| Material | Longitud de onda (nm) | Potencia máxima | Aplicaciones | Empresas |
| Erbio (fibra dopada) | 980-1550 | 10W | Soldadura de materiales Robótica | Lasea SA |
| | 1085-1095 | | Control de calidad Sensado remoto | Japan Laser Corp |
| | 1530-1620 | 2KW | Soldadura Manipulación de metales | IPG Photonics Corp |
| | 1535-1565 | | Procesado de materiales Sensado remoto | PolarOnyx Inc |
| Ti | 1800-2100 | 2KW | Corte, soldadura y mecanizado de diversos materiales | IPG Photonics Corp |
| Yterbio (fibra dopada) | 1030-1080 | | Procesado de materiales Biotecnología | PolarOnyx Inc |
| | 1060-1080 | 1.2W | Procesado de materiales Sensado | Lumics GmbH |
| | 1060-1070 | | Procesado y corte de materiales | Laser Photonics |
| | 1060-1070 | 50W | Construcción Corte y grabado de materiales | Rofin-Baasel Inc |
| | 1080-1090 | 50W | Instrumental médico Procesado de materiales Soldadura | Nufern |
| | 1030-1120 | 50KW | Corte y soldadura de materiales | IPG Photonics Corp |

Tabla 2.: Resumen de la oferta comercial de láseres de fibra óptica de onda continua (CW).

Dadas estas prestaciones, y dada su disponibilidad comercial cada vez más abundante, la aceptación de la tecnología de los láseres de fibra óptica ha ido creciendo uniformemente en todo el mundo [21].

A día de hoy, el procesamiento de materiales con láser de fibra óptica es una tecnología real de sustitución. Es decir, muchas compañías están comenzando a llevar a cabo su producción con la ayuda de estos láseres y están comenzando a ver como un signo de expansión y mejora la sustitución de sus viejos láseres.

Otra área donde los láseres de fibra óptica están incrementando su mercado es en el campo de las aplicaciones móviles donde, debido a su reducido tamaño, estos láseres pueden transportarse fácilmente.

Actualmente existen láseres de fibra comerciales con niveles de potencia de salida de hasta 50KW. Estos láseres han demostrado unas prestaciones nunca conseguidas hasta ahora en cuanto a velocidad y profundidad de penetración. Este hecho ha dado lugar a la expansión de los láseres de fibra en el ámbito del procesamiento de materiales.

3.1.6. Tipos de láseres según el método de generación de las longitudes de onda

Los láseres de fibra basados en amplificación EDFA así como amplificación Raman, precisan de algún tipo de sistema para la generación de longitudes de onda concretas. En este apartado se describen dos de los métodos utilizados en este Trabajo Fin de Máster para conseguir esta selección así como las características y ventajas de cada uno.

Generación mediante FBGs

El diseño de láseres mediante FBGs ha aumentado en los últimos años gracias a la evolución de las tecnologías de diseño. Actualmente se pueden conseguir FBGs con anchos de banda <0.2 nm y con reflectividades $>95\%$.

Los esquemas pueden ser diseñados mediante FBGs en reflexión combinados con circuladores o utilizando dispositivos especiales como los *add-drop filters* (ADF). En [22] se propone un diseño mediante un ADF y amplificación mediante fibra dopada con erbio, cuyo esquema se puede ver en la Figura 3.1.7.

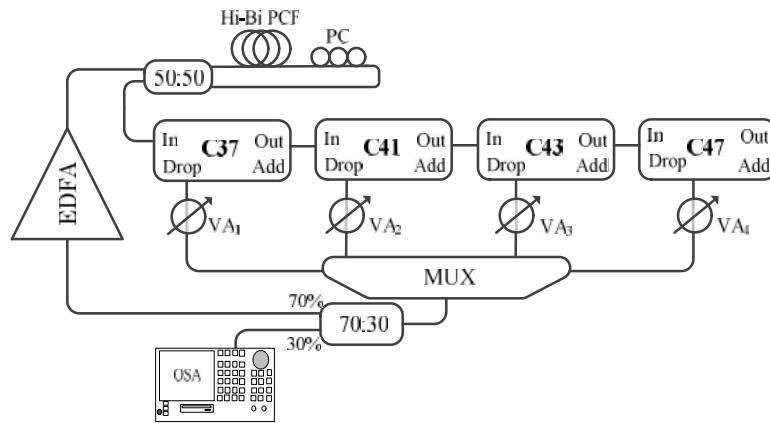


Figura 3.1.7.: Esquema de la configuración de un láser sintonizable basado en multiplexores add-dropp y amplificación mediante fibra dopada con erbio [22]

Los láseres diseñados en este proyecto se han basado en FBGs acompañados de amplificación EDFA. En la Figura 3.1.8 se puede ver la creciente evolución en el número de publicaciones de láseres de fibra dopada con erbio con FBGs para la generación de múltiples longitudes de onda.

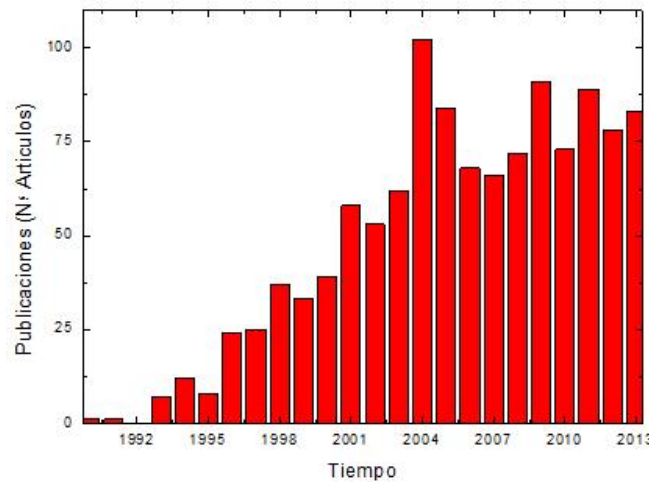


Figura 3.1.8.: Gráfico de la evolución del N° de publicaciones sobre EDFA con FBGs

Generación mediante WDMs

Otro método es la utilización de un WDM (Wavelength división multiplexer) para la generación de las longitudes de onda. En el esquema de la Figura 3.1.9 se puede ver un ejemplo de una estructura en la cual, mediante un demultiplexor se separan las longitudes de onda y después la luz es de nuevo insertada en la cavidad mediante un multiplexor y amplificada [23].

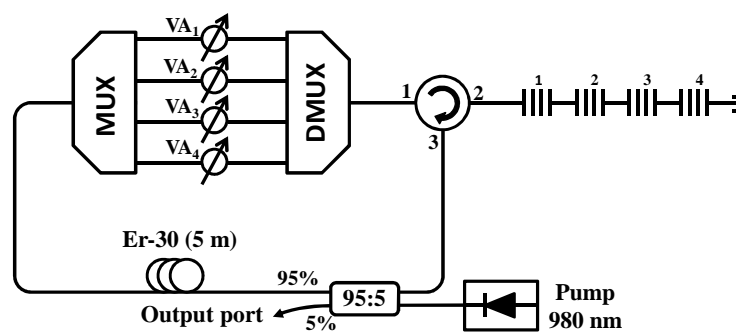


Figura 3.1.9.: Ejemplo de una de las configuraciones estudiadas experimentalmente para la generación de láseres mediante multiplexores de longitud de onda [23].

En este caso y como se puede apreciar en los resultados, el sistema está ecualizado, mediante la inclusión de atenuadores que controlan cada longitud de onda.

3.1.7. Limitaciones de los láseres

En este apartado se presentan las principales limitaciones de los láseres de fibra óptica, así como medios y configuraciones utilizadas para reducirlos. La mayor parte de las limitaciones provienen de efectos derivados del medio de amplificación utilizada.

Hole burning espacial

El “*spatial hole burning*” es un proceso que se da en los láseres de fibra dopada con erbio en anillo. Cuando una señal viaja en ambos sentidos dentro del anillo se genera un patrón de interferencia dando lugar a una onda estacionaria. La inversión de población generada en la fibra

dopada será consumida principalmente en los antinodos, obteniendo la amplificación en estos puntos, mientras que en los nodos se acumularía la inversión de población sin producir amplificación. Este proceso es causante de inestabilidades del sistema [24].

La solución que se presenta es la introducción de aisladores a la salida de la EDF de forma que se asegure que la señal solo circula en un único sentido como en [25]. En determinados esquemas realizados con circuladores no son necesarios los aisladores ya que los circuladores garantizan el funcionamiento en único sentido del láser [27].

Forma de la ganancia

Uno de los principales problemas en la generación de láseres de fibra es el comportamiento de la ganancia del amplificador. Se puede diferenciar entre medio homogéneo e inhomogéneo, ambos ilustrados en la Figura 3.1.10, [27] donde las líneas delgadas corresponden a la curva de ganancia sin saturar y las líneas gruesas a la ganancia en saturación mediante la introducción de una señal a amplificar.

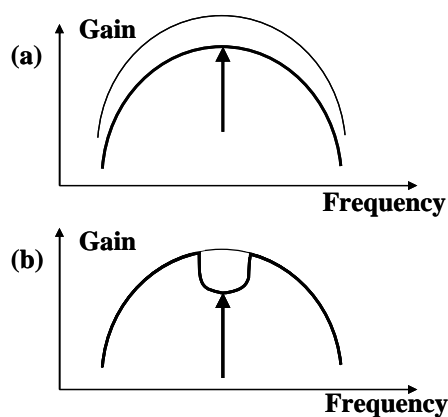


Figura 3.1.10.: Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo (a) y un medio inhomogéneo (b) [28]

Como se puede ver en el caso de un medio homogéneo, la saturación de la señal amplificada provoca que la curva de ganancia varíe en todo el espectro, mientras que en el caso inhomogéneo, solo se satura la longitud de onda introducida manteniendo sin variación el resto del espectro.

Los EDFA tienen un comportamiento homogéneo a temperatura ambiente, la principal causa de este fenómeno es el tiempo de vida del estado excitado, al saturarse a una longitud de onda la energía de los estados excitados se reduce provocando una reducción de la emisión espontánea. Esto es un problema para la generación de EDFLs con múltiples longitudes de onda, ya que las variaciones de amplitud de una de ellas modificará la curva de ganancia del amplificador y por lo tanto estará afectando directamente a la amplitud del resto de longitudes de onda provocando inestabilidades. Sin embargo es posible conseguir que un EDFA se comporte de forma inhomogénea enfriando la fibra dopada a temperaturas de 77°K [29].

La amplificación Raman por otro lado se comporta como un medio inhomogéneo por lo que permitirá conseguir láseres multilínea con mayor estabilidad a temperatura ambiente.

Láseres multilínea (MW, multi-wavelength)

Dadas las actuales necesidades tanto de los sistemas de comunicación como de las redes de sensores uno de los objetivos dentro del diseño de láseres de fibra óptica es conseguir tener el mayor número de longitudes de onda posibles. En este sentido existen dos limitaciones principales, la ecualización de las amplitudes de cada longitud de onda y la estabilidad del sistema. Ambas limitaciones están asociadas a la amplificación, en el primer caso dependerá de cómo se reparta la ganancia disponible en el momento de ajustar el láser, mientras que en el segundo caso dependerá del comportamiento del sistema ante fluctuaciones de amplitud.

3.2. Trabajos preliminares

El punto de partida de este Trabajo Fin de Máster estuvo basado en un montaje previamente desarrollado sobre un láser monomodo de emisión multilínea utilizando Dense WDM (DWDM) para sensores de fibra óptica [23] y realizando las modificaciones necesarias para obtener diferentes resultados junto al grupo de trabajo de Comunicaciones Ópticas. Se comenzó trabajando con dicho grupo para finalmente poder trabajar individualmente con algún montaje propio.

En la Figura 3.2.1 se observa el montaje nombrado anteriormente del grupo de trabajo de Comunicaciones Ópticas:

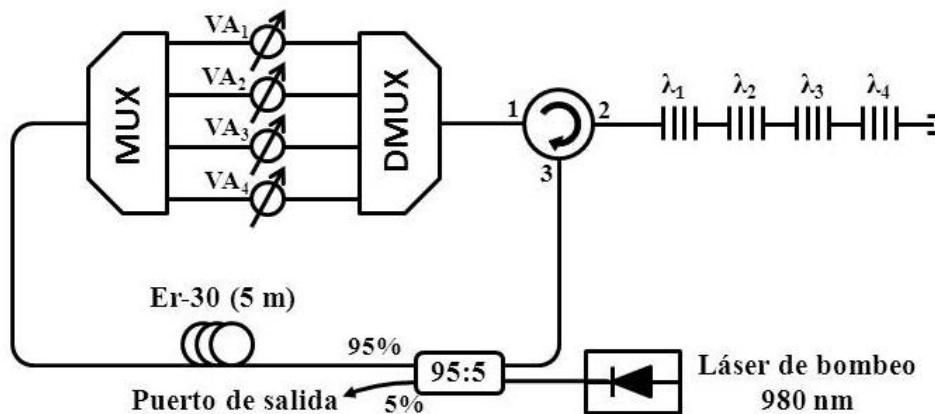


Figura 3.2.1.: Láser de fibra monomodo de cuatro longitudes de onda de emisión para aplicaciones con sensores.

En este trabajo se propone y demuestra experimentalmente un nuevo láser monomodo multilínea con configuración en anillo para aplicaciones relacionadas con los sensores de fibra óptica. Esta topología en anillo está basada en un multiplexor/demultiplexor (MUX/DMUX) y emplea redes de difracción de Bragg (FBGs) para seleccionar las longitudes de onda de operación. Mediante el montaje mostrado en la figura 3.13 se han obtenido cuatro líneas de emisión simultáneas con una relación señal-ruido óptica (OSNR) mayor de 55dB, comprobando su operación en régimen monomodo. Utilizando un método de medida con auto-heterodinaje se han medido los anchos de banda de las líneas de emisión de hasta 5.33 kHz. Además se ha verificado el sistema para la medición de la temperatura, obteniéndose una sensibilidad de 9 pm/°C. Por último, se ha investigado la aplicabilidad del esquema para aplicaciones de interrogación de sensores de manera remota [23].

Una vez estudiado y entendido este trabajo junto al Grupo de Comunicaciones Ópticas y entendido el funcionamiento, se pasó a desarrollar nuevas variantes o nuevos montajes que se explicaran en el CAPÍTULO IV.

3.3. Objetivo

El objetivo general del TFM estará centrado en el estudio tanto teórico como experimental de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda (WDM según sus siglas en inglés) así como en el desarrollo de láseres de fibra con emisión multilínea. La idea perseguida a la hora de implementar todos estos sistemas de detección será la de optimizar, en la medida de lo posible, la mayor parte de los parámetros obtenidos (relación señal a ruido, estabilidad en longitud de onda y en potencia de salida tanto en función de la temperatura como del tiempo, etc...). Más concretamente se diseñarán, evaluarán y optimizarán diferentes redes de multiplexación de sensores amplificadas de fibra óptica con el fin de incrementar la distancia y el número de sensores en la red.

CAPÍTULO IV Montaje y resultados

4.1. Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica mediante la introducción de PS-FBGs.

En este apartado se lleva a cabo experimentalmente un nuevo láser monomodo multilínea con configuración en anillo para aplicaciones relacionadas con los sensores de fibra óptica. Como se ha nombrado en el CAPÍTULO III, este montaje está basado en el artículo *"Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation based on DWDMs for sensing applications"* [23]. La mejora respecto al montaje del artículo mencionado es la introducción de PS-FBGs con la intención de conseguir que el láser monomodo multilínea tenga anchuras de línea lo más estrecha posible. Esta topología en anillo está basada en un multiplexor/demultiplexor (MUX/DMUX) y emplea redes de difracción de Bragg (FBGs y PS-FBGs) para seleccionar las longitudes de onda de operación.

4.1.1. Funcionamiento del láser de bombeo junto al fibras dopados

El primer paso es comprobar el correcto funcionamiento del bombeo de 980nm junto a la fibra dopada con erbio para asegurarse de que la curva de ganancia es la deseada para la realización del montaje que se va a realizar. Para ello simplemente se debe realizar un montaje como el de la figura 4.1.1, con el bombeo conectado a la entrada de la fibra dopada con erbio y la salida de la fibra dopada con erbio al Optical Spectrum Analyzer (OSA).

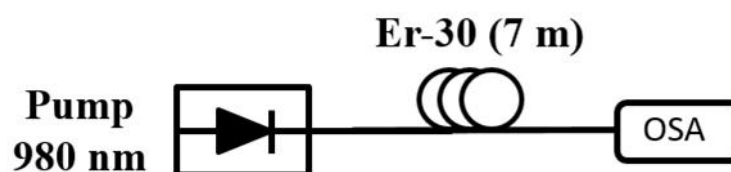


Figura 4.1.1: Esquema de bombeo junto a fibra dopada con erbio

El resultado de la curva de ganancia del bombeo junto con la fibra dopada con erbio se puede observar en la figura 4.1.2, deduciendo de dicho resultado que su funcionamiento es correcto, y a su vez, que es adecuado para su utilización en el montaje que se desarrolla a continuación. Esta conclusión es debido a que la curva de ganancia obtenida debe de agrupar dentro de ella las diferentes longitudes de onda de los FBGs que se van a utilizar. Esas longitudes de onda se encuentran en el rango de 1539nm a 1552nm, por lo que la ganancia será suficiente para conseguir el objetivo deseado.

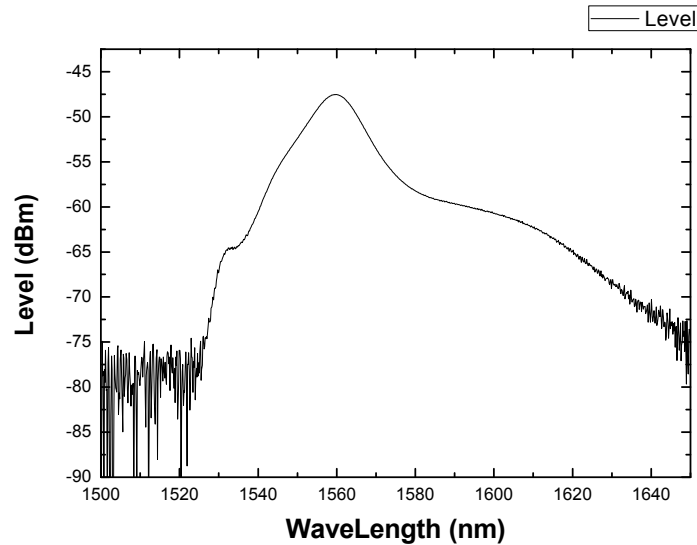


Figura 4.1.2: Curva de ganancia del esquema de la figura 4.1.1

4.1.2. Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica sin introducir PS-FBGs.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del bombeo con fibra dopada con erbio, se va a realizar nuevamente el montaje en el que está basado [23] para después poder realizar las modificaciones necesarias y conseguir que el láser monomodo multilínea tenga anchuras de línea lo más estrechas posible.

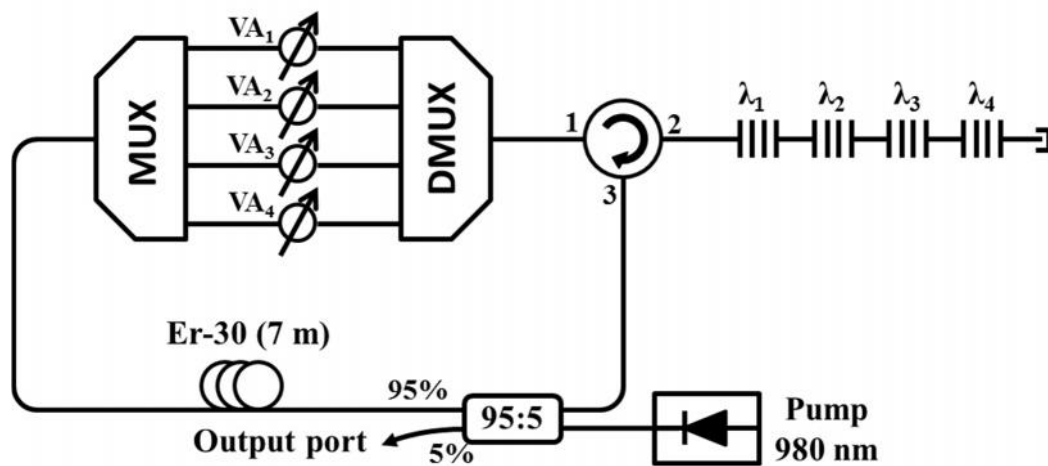


Fig. 4.1.3: Láser de fibra monomodo de cuatro longitudes de onda de emisión propuesto, para aplicaciones con sensores.

En la Figura 4.1.3 se puede ver el esquema experimental del láser multilínea propuesto. Éste consiste en un anillo con una sección de fibra fuertemente dopada con erbio (Er-30 proporcionada por la empresa Liekki con una absorción de 10.8 dB/m a 978 nm) que actúa como medio activo. La amplificación se obtiene utilizando 7 metros de esta fibra y, debido a la alta concentración de erbio, la longitud necesaria para la cavidad es menor que en otros casos [12]. Adicionalmente se ha utilizado un acoplador óptico con un factor de acoplo del 95% para cerrar la cavidad. Este acoplador se utiliza para insertar la señal de bombeo de 980 nm en la cavidad así como para extraer un 5% de la salida del láser y analizarla en el analizador de espectros óptico con una resolución máxima de 0.01 nm.

Dentro del anillo se encuentra también un multiplexor - demultiplexor (MUX-DMUX) de cuatro canales con un ancho de banda por canal de 200 GHz utilizado para filtrar el ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission) generado por la amplificación mediante fibra dopada con erbio (EDFA). Esto mejora la eficiencia de amplificación y obtiene una respuesta espectral más plana. Los canales ITU utilizados por el MUX/DMUX son C31, C35, C41 y C47 que corresponden a las longitudes de onda 1552.52 nm, 1549.32 nm, 1544.53 nm y 1539.77 nm respectivamente. El montaje incluye asimismo cuatro FBGs situados dentro de estos canales con las correspondientes longitudes de onda centrales de 1552.33 nm, 1549.6 nm, 1544.38 nm y 1539.9 nm y anchos de banda a mitad de potencia (FWHM) de 0.24 nm, 0.21 nm, 0.28 nm y 0.2 nm respectivamente. En cada canal se introduce un atenuador óptico variable para permitir un ajuste preciso de las pérdidas de la cavidad para cada línea de emisión y así conseguir la oscilación simultánea de éstas. Esto es necesario ya que uno de los principales problemas en láseres de anillo multilínea es el diferente umbral de oscilación para cada longitud de onda, debido al perfil no uniforme de la ganancia mediante amplificación con fibra dopada con erbio.

Una de las ventajas de esta estructura utilizando MUX/DMUX en comparación con el típico filtrado en línea es que permite el control individual de las pérdidas en cada canal mediante los atenuadores variables situados entre el MUX y el DMUX. Por esto, además de las pocas pérdidas que introducen estos dispositivos, se puede aumentar fácilmente el número de líneas de emisión de esta estructura reemplazando el MUX/DMUX por uno con mayor número de canales. Hay que destacar que esta topología permite una ecualización individual de las señales reflejadas por los FBGs a pesar de que éstos se encuentran conectados en serie. Tras ser reflejadas en los FBGs, las señales son reintroducidas en el anillo mediante un circulador óptico, lo que asegura un funcionamiento unidireccional del anillo y por lo tanto evita fenómenos de interferencia como el *spatial hole-burning*. Por último, y para evitar reflexiones indeseadas de Fresnel, los extremos libres de este montaje fueron sumergidos en gel adaptador de índice

Como resultado, en la Fig. 4.1.4 se puede ver el espectro de salida del láser medido en el OSA para una potencia de bombeo de 110 mW. Como puede observarse se han obtenido las cuatro líneas de emisión con potencias ópticas de salida en torno a -30 dBm. Esta potencia máxima es 35 dB mayor que la generada por el nivel de ruido ASE para los cuatro canales. Numerosos estudios anteriores muestran que estos valores son razonablemente buenos para la mayoría de aplicaciones con sensores [31].

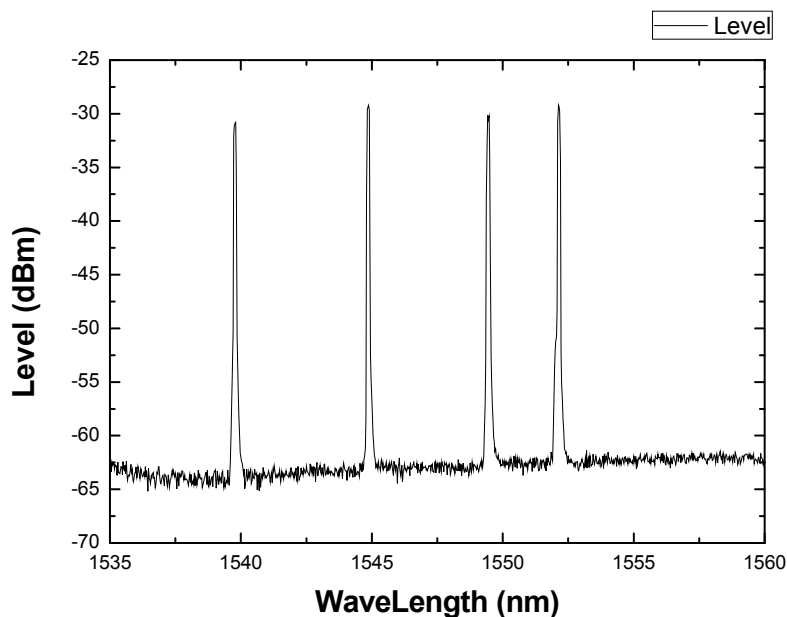


Fig. 4.1.4: Espectro de salida del láser medido con un analizador de espectros ópticos.

Cabe destacar que la potencia de salida obtenida en el OSA es de -30dBm aproximadamente con una sensibilidad de -65dBm, pero hay que tener en cuenta que el OSA utilizado tiene unas pérdidas de aproximadamente -20dBm, que en medidas finales es corregido, pero en estos casos iniciales, al ser pruebas, no se corrigieron.

4.1.3. Introducción de los PS-FBGs

La principal tarea antes de introducir en el montaje las redes de difracción de Bragg con salto de fase (PS-FBG) es la elección de dichos componentes según su longitud de onda. Es necesario que los FBG y los PS-FBG coincidan en la misma longitud de onda para intentar conseguir que la anchura de línea de los láseres resultantes sean lo más estrechas posible. Los PS-FBG, al contrario de los FBG, interesa utilizarlos en transmisión, consiguiendo que su pico coincida en la medida de lo posible con el pico obtenido de los FBG en reflexión como se puede ver en el ejemplo de la Figura 4.1.5. Por lo tanto, dentro del material disponible en el laboratorio en cuanto a PS-FBGs, se ha seleccionado cuatro, centrados en las longitudes de onda de 1553 nm, 1549.97 nm, 1545.1 nm y 1539.8 nm, haciéndolo coincidir en la mayoría de lo posible con los de los cuatro FBGs que están centrados en 1552.52 nm, 1549.32 nm, 1544.53 nm y 1539.77 nm respectivamente.

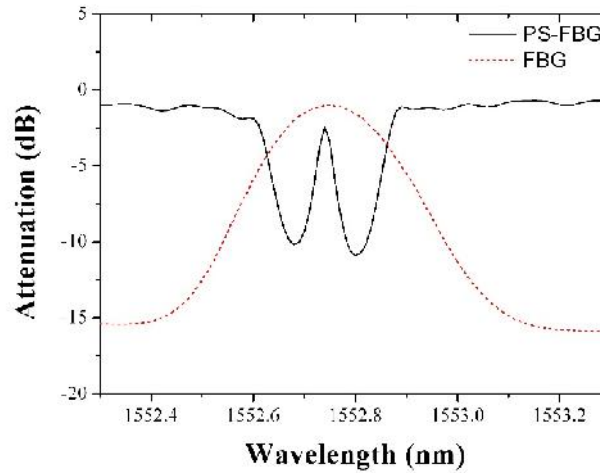


Fig. 4.1.5: Ejemplo de superposición deseada de la respuesta en transmisión del PS - FBG y la respuesta en reflexión del FBG

Una vez seleccionados los PS-FBGs se introducen dentro de montaje, concretamente uno en cada canal del MUX/DMUX, después de los atenuadores, como se puede observar en la Figura 4.1.6.

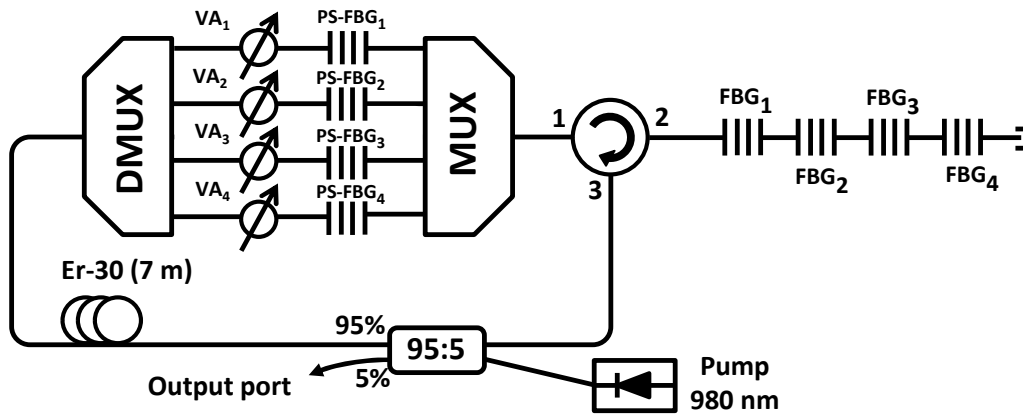


Fig. 4.1.6: Introducción de PS-FBG en el montaje de láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra

En cuanto a los resultados, cabe destacar la dificultad a la hora de ecualizar las diferentes líneas de emisión. Se cree que esta dificultad puede ser debida a la falta de potencia del bombeo a 980 nm, ya que el láser de bombeo utilizado en estas medidas, de la marca Amonics (modelo ALD98-100-B-FA) solamente llegaba hasta los 110mW de potencia de salida. La siguiente prueba se realizó con otros dos bombeos de potencias superiores, 330mW y 450mW concretamente, ya que debido a la dificultad para ecualizar las líneas de salida, resulta difícil advertir la mejora introducida mediante el uso de los PS-FBGs.

A pesar de la dificultad para su ecualización debida a la competición de modos, se han conseguido ecualizar estas cuatro líneas de emisión en las diferentes longitudes de onda como se observa en la figura 4.1.7, aunque se espera una gran mejoría con el cambio del bombeo que se explicará en el siguiente apartado.

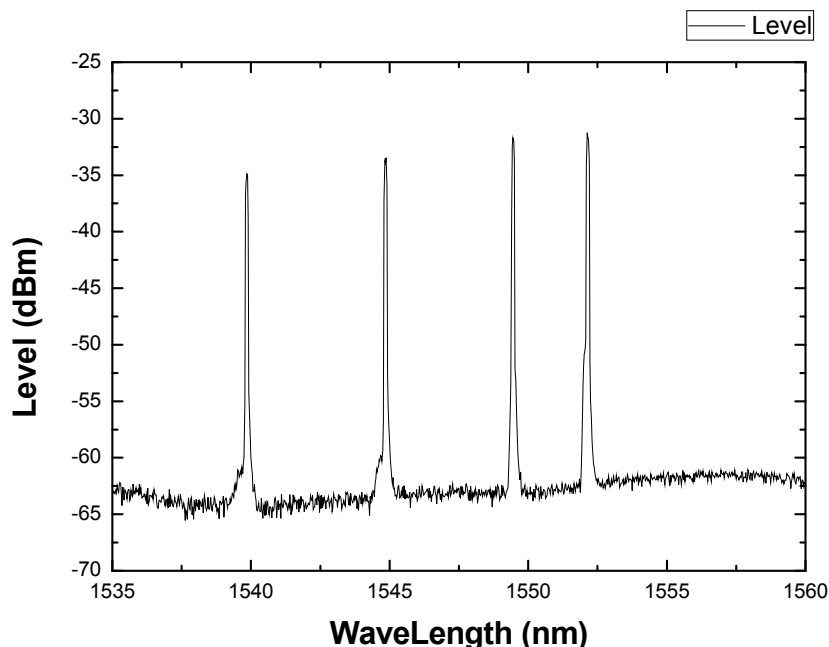


Fig. 4.1.7: Resultado obtenido mediante el uso de PS-FBGs y FBGs y un láser de bombeo de baja potencia.

4.1.4. Utilización de láseres de bombeo a 980 nm con potencias de 330mW y 450mW

Con el objetivo de aumentar la estabilidad de las potencias ópticas de salida, se intercambia el láser de bombeo utilizado (Armonics ALD98-100-B-FA) por otro capaz de emitir una potencia óptica de 330mW. Este nuevo láser de bombeo, de la marca Thorlabs, de estructura en mariposa con una potencia de salida máxima de 330mW, junto con el controlador de temperatura e intensidad también de la marca Thorlabs, modelo CLD1015, además de ser capaz de emitir más potencia óptica, tiene un espectro de emisión mucho más estrecho en torno a los 980nm. Esto influye en la curva de ganancia obtenida al pasar por la fibra fuertemente dopada con erbio, ya que cuanto más estrecho sea el láser de bombeo a 980nm, se obtendrá más potencia a la salida de la fibra dopada con erbio. A pesar de tener más potencia, tiene el inconveniente de que la amplificación lograda tendrá un menor rango en longitud de onda. A pesar de tener menor rango, es suficiente para abarcar de 1535nm a 1555nm, con lo que para el montaje diseñado se espera una mejora notable respecto a la ganancia.

En la figura 4.1.8 se puede observar como el resultado obtenido es el esperado, ya que tenemos una mayor ganancia respecto a la figura 4.1.7. Además, se ha conseguido que esa dificultad a la hora de ecualizar las líneas de emisión se reduzca notablemente, dando un resultado muy positivo, y llegando a la conclusión de que es mucho más conveniente para continuar con el montaje utilizar el láser bombeo de la marca Thorlabs, que el Armonics ALD98-100-B-FA.

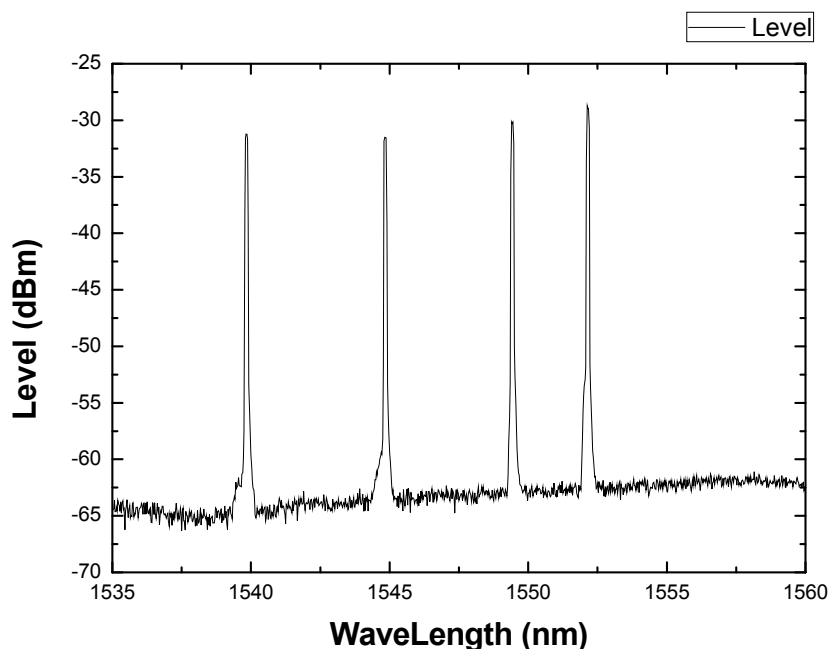


Fig. 4.1.8: Resultado obtenido utilizando el láser de bombeo de la marca Thorlabs con potencia de salida de 330mW

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del láser de bombeo de la marca Thorlabs con una potencia de salida de 330mW, también se decide probar el mismo modelo pero con un nivel de potencia óptica de salida de 450mW, a pesar de que la potencia utilizada satisfizo nuestras expectativas, pero con la intención de observar una posible mejora en los resultados en cuanto a diversos factores.

Se observa que al introducir el nuevo láser de bombeo de 450mW de potencia de salida, la dificultad para ecualizar las cuatro líneas de emisión se mantuvo similar al obtenido usando el láser de bombeo de 330mW, pero en ningún momento mejorándolo. Como dato curioso, y para demostrar que cada laser de bombeo actúa de forma diferente, dependiendo de la anchura y de la potencia, en la figura 4.1.9 se observa como dejándolo ecualizado como en el caso del bombeo de 330mW y poniendo el bombeo de 450mW a la misma potencia del anterior, las cuatro líneas de emisión en las diferentes longitudes de onda dejan de estar ecualizadas. Una vez ecualizadas, y a su máxima potencia, sí que se consigue la ecualización deseada como se observa en la figura 4.1.10, aumentando la salida en las líneas de emisión.

Tras evaluar los resultados obtenidos, se optó por realizar los experimentos con el láser de bombeo de estructura en mariposa con potencia de salida máxima de 330mW, ya que ofrecía una mejor respuesta espectral.

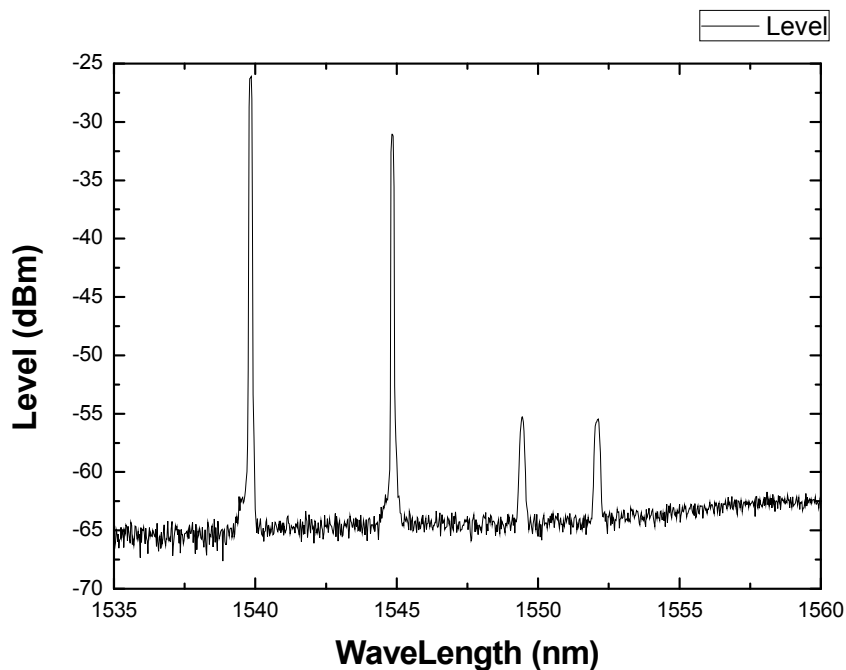


Fig. 4.1.9: Resultado sin ecualizar con láser de bombeo de estructura en mariposa con potencia máxima de 450mW

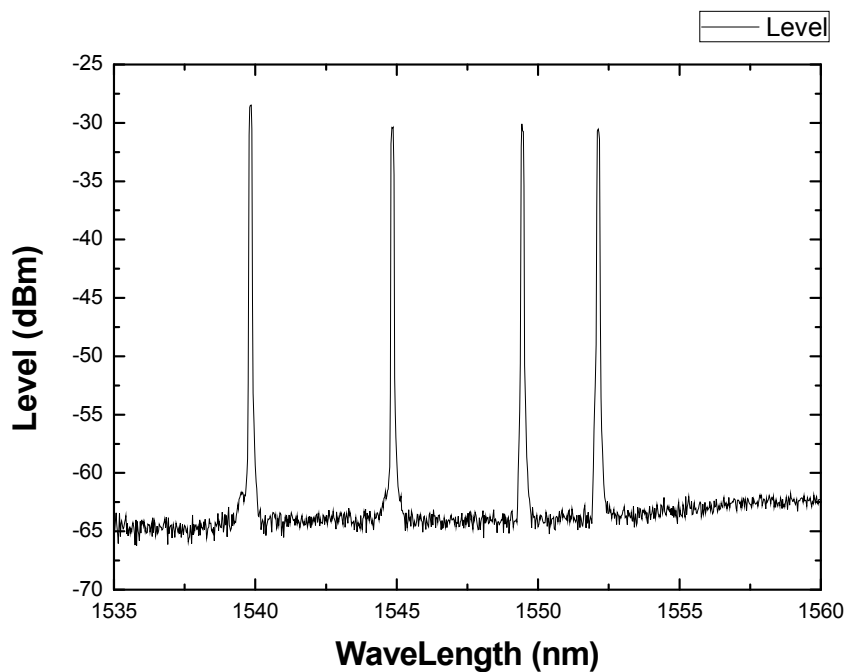


Fig. 4.1.10: Resultado ecualizado con láser de bombeo de estructura en mariposa con potencia máxima de 450mW

4.1.5. Caracterización

Una vez seleccionado el láser de bombeo que mejor se ajusta a nuestras necesidades, se marca como siguiente objetivo intentar que los PS-FBGs sean de la misma longitud de onda que sus FBGs correspondientes, ya que los inicialmente seleccionados se ajustan bastante, pero si el pico del PS-FBG en transmisión no coincide en su mayoría con el pico del FBG en reflexión no se conseguirá que su línea de emisión sea más estrecha que sin el uso de los PS-FBGs.

Para caracterizar cada componente se debe de utilizar una fuente de ruido blanco (BBS, según sus siglas en inglés), conectarla al componente deseado y monitorizar su espectro de salida mediante el uso de un OSA, como se puede observar en el esquema de la figura 4.1.11.

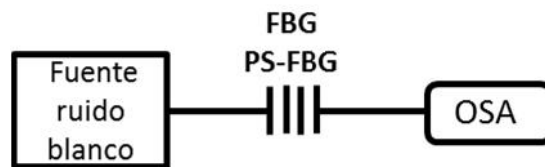


Fig. 4.1.11: Esquema para la caracterización del espectro óptico de componentes pasivos como los FBG ó PS-FBGs

Se realiza la caracterización de todos los componentes, tanto FBGs como PS-FBGs, cuyos espectros ópticos se cree que pueden solapar en longitud de onda, y se comparan entre ellos. De dicha comparación, los mejores resultados obtenidos son los que se observan en las siguientes figuras:

- FBG a 1539.75nm con PS-FBG a 1539.8nm

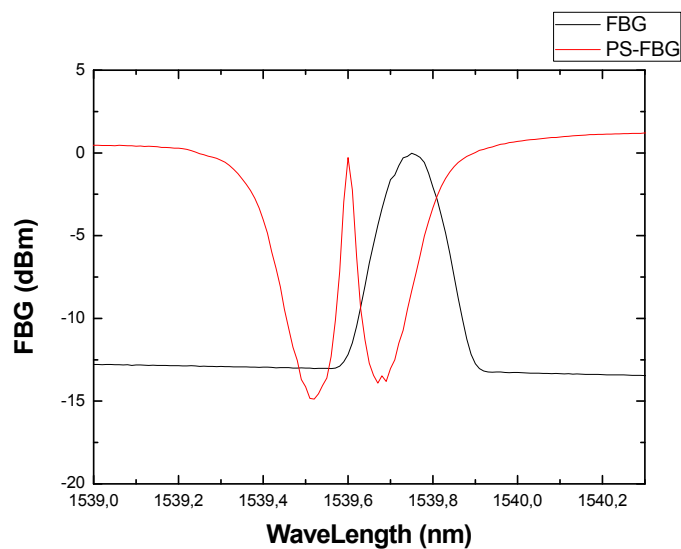


Fig. 4.1.12: Caracterización FBG a 1539.75nm con PS-FBG a 1539.8nm

- FBG a 1545nm con PS-FBG a 1544.85nm

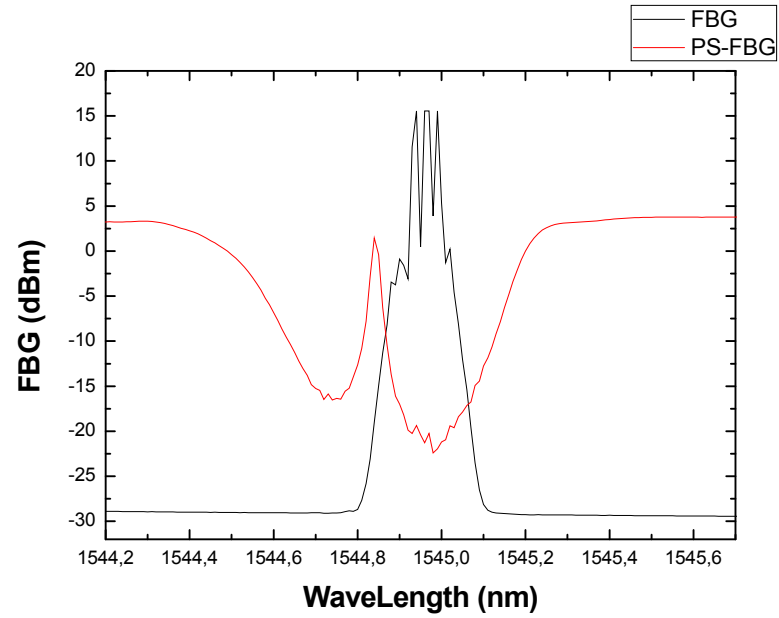


Fig. 4.1.13: Caracterización FBG a 1545nm con PS-FBG a 1544.85nm

- FBG a 1549.45nm con PS-FBG a 1549.6nm

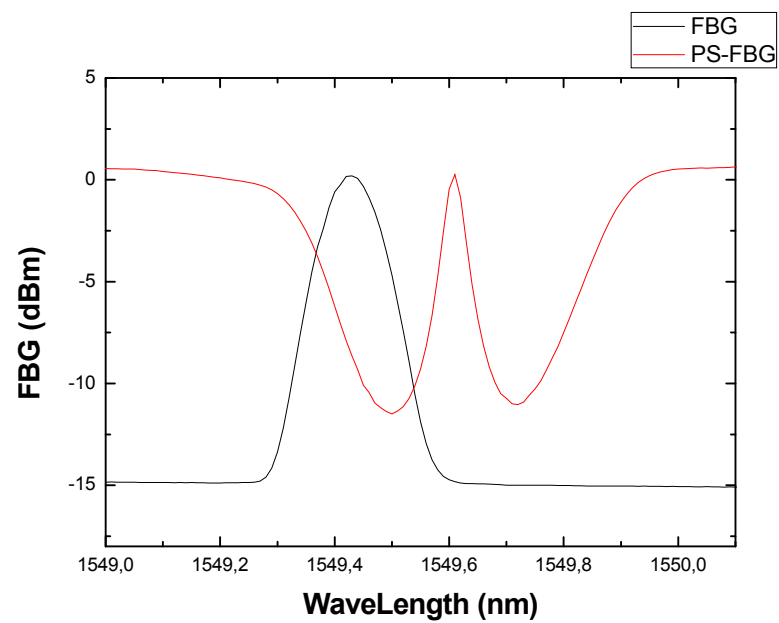


Fig. 4.1.14: Caracterización FBG a 1549.45nm con PS-FBG a 1549.6nm

- FBG a 1552.1nm con PS-FBG a 1552.8nm

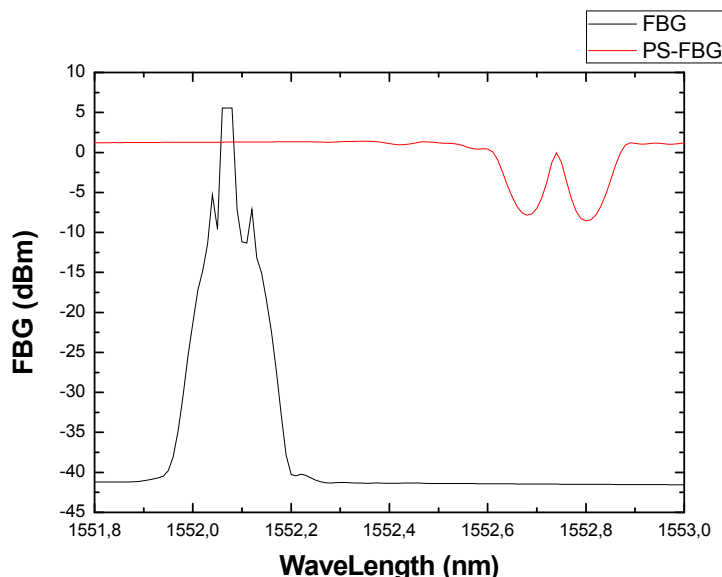


Fig. 4.1.15: Caracterización FBG a 1552.1nm con PS-FBG a 1552.8nm

Como se puede observar, ninguna de las cuatro combinaciones de los espectros ópticos FBG con PS-FBG satisface nuestras necesidades. Por ello se va a pasar a la utilización de FBGs sintonizables, pudiendo sintonizarlos en la longitud de onda deseada para así centrarlo en el mismo punto que el PS-FBG deseado.

Debido a la disponibilidad del material en laboratorio, únicamente se dispone de dos FBGs sintonizables. Lo ideal hubiese sido disponer de cuatro FBGs sintonizables para conseguir solapamientos perfectos, pero al disponer de dos se decide que los que peor solapamiento de espectros ópticos tienen son los centrados en 1549nm (figura 4.1.14) y 1552nm (figura 4.1.15).

Para sintonizar los FBGs sintonizables se crea un pequeño montaje como el que se observa en la figura 4.1.16 en el cual, con un láser de bombeo de 980nm conectado a un trozo de fibra fuertemente dopada con erbio y situando a continuación el FBG sintonizable, se obtiene midiendo con el OSA la curva de ganancia explicada al inicio de este montaje (figura 4.1.2) junto al valle del FBG. Después simplemente girando la rueda del FBG sintonizable hay que centrar dicho valle en la longitud de onda donde tenemos los PS-FBGs, en este caso uno de los sintonizables en 1549.6nm y el otro en 1552.8nm.

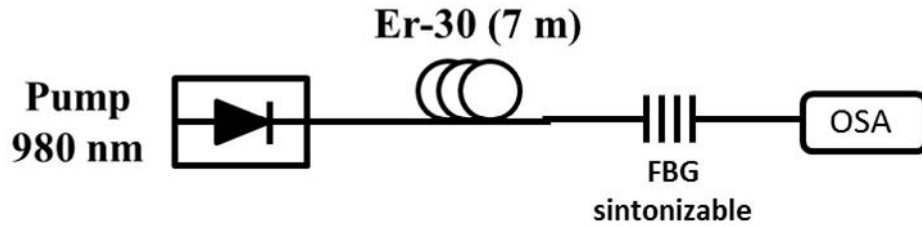


Fig. 4.1.16: Esquema sintonización FBG sintonizables

Una vez centrados los FBGs sintonizables, los resultados son los deseados ya que esta vez sí que solapa el FBG con el PS-FBG en los casos de 1549.6nm como se observa en la figura 4.1.17 y en 1552.8nm en la figura 4.1.18. Es destacable que los FBGs en este caso están medidos en transmisión, por lo que el pico debería de ser un valle en realidad, pero a la hora de tratar los datos se ha realizado la inversa para visualizarlos como será realmente ya que en el montaje final los FBGs se utilizan en reflexión.

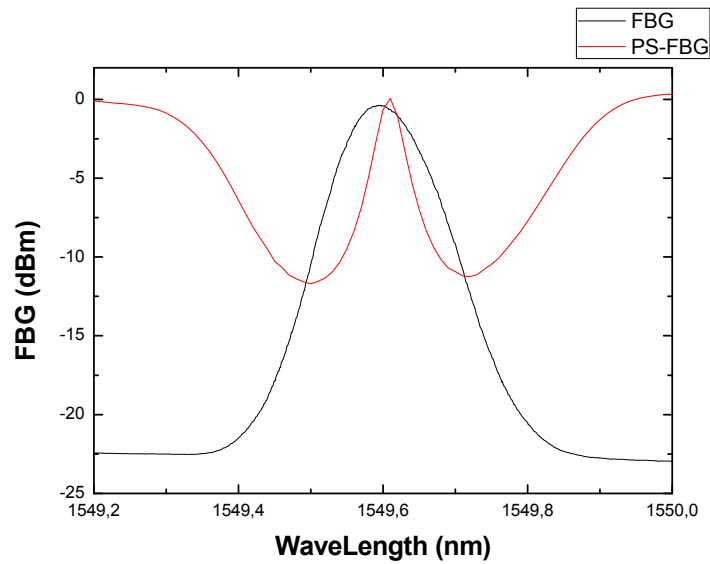


Fig. 4.1.17: Caracterización FBG sintonizable a 1549.6nm con PS-FBG a 1549.6nm

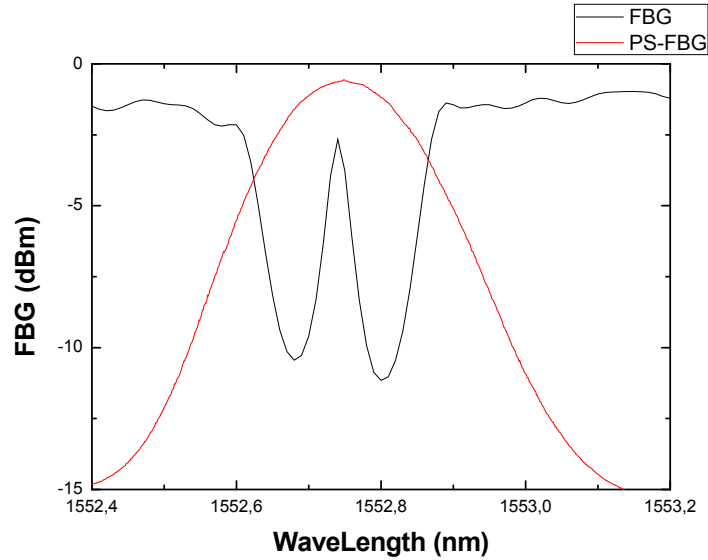


Fig. 4.1.18: Caracterización FBG sintonizable a 1552.8nm con PS-FBG a 1552.8nm

4.1.6. Anchura de línea

Una vez realizado el montaje, se tiene que corroborar que las anchuras de línea obtenidas son más estrechas que las obtenidas previamente en el montaje *"Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation based on DWDMs for sensing applications"* [23]. Para ello se debe de realizar una modificación en el montaje realizado a partir de la salida del 5% del acoplador 95:5. A esa salida se conecta un acoplador de 3dB, por una de cuyas dos salidas conectamos 2 kilómetros de fibra para introducir un retardo en la señal. En la otra rama del acoplador conectamos un modulador de fase (POM , Avanex IM10 - P) en combinación con un generador de RF (Rohde & Schwarz SMT02) a 1Ghz para conseguir la modulación deseada, conectando la salida de estos dos últimos a otro acoplador de 3dB. Se utiliza un filtro sintonizable (2 nm FWHM) para seleccionar la línea de emisión de medir. Por último, para medir los datos obtenidos, se conectarán un OSA y un Electrical Spectrum Analyzer (ESA en sus siglas en inglés) en cada una de las salidas de este último acoplador. Esta configuración, basada en el método auto-heterodino [32], se puede observar en el montaje de la figura 4.1.19.

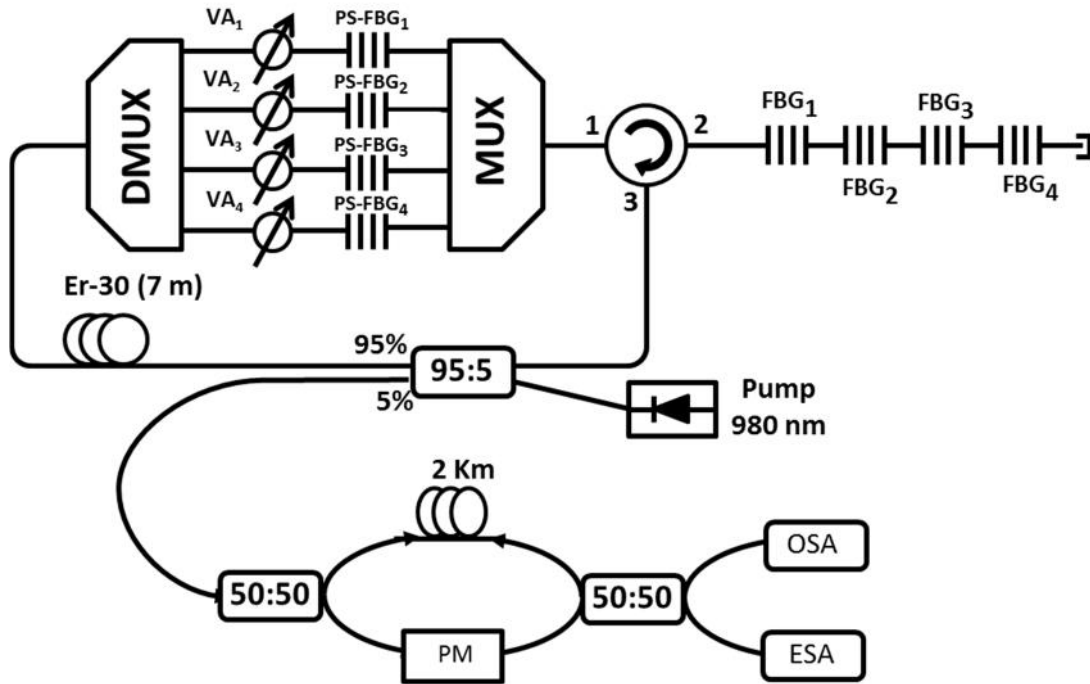


Fig. 4.1.19: Montaje para la medición de la anchura de línea.

Debido a que las anchuras de línea obtenidas por las dos líneas de emisión en las longitudes de onda de 1539nm y 1545nm serán similares, al igual que las de 1549nm y 1552nm también lo serán entre ellas, se muestran los resultados de las obtenidas en 1545nm y 1549nm, no sin antes haber certificado que la anchura obtenida en los otros dos casos son similares. De acuerdo con [32], este espectro es dos veces el ancho de banda de láser debido a teorema de Lorentz. En consecuencia, el ancho de banda en el canal 35 (línea de emisión a 1549nm) es de 2,2 kHz como se puede observar en la figura 4.1.21, valor cercano al ancho de banda del canal 41 (línea de emisión a 1445nm) de 2.33 kHz que también se puede observar en la figura 4.1.20. El resto de los anchos de banda medidos varían entre 3,1 kHz y 2,2 kHz.

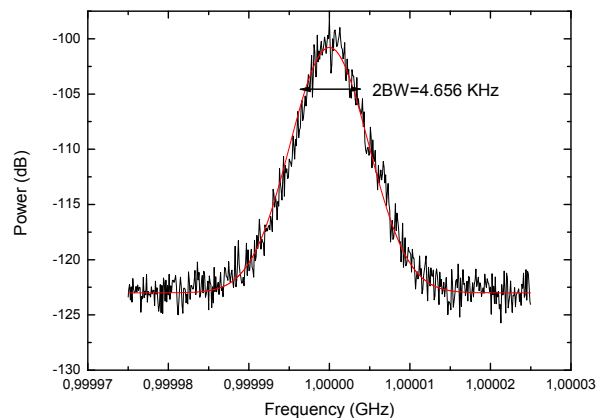


Fig. 4.1.20. Medida experimental de la anchura de línea del canal 41, línea de emisión a 1545nm.

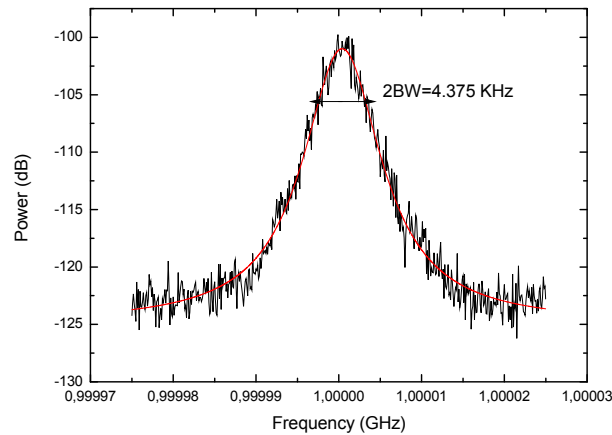


Fig. 4.1.21: Medida experimental de la anchura de línea del canal 35, línea de emisión a 1549nm.

Como era de esperar, mediante el uso de PS- FBGs dentro de la cavidad del anillo se obtuvieron líneas de emisión más estrechas. En comparación con los resultados obtenidos en trabajos previos, en los que la anchura de línea de las líneas de emisión varió desde 5,3 hasta 8,1 KHz [23], se han obtenido mejores resultados en este caso, donde se han medido anchos de línea comprendidos entre 2,2 kHz y 3,1 kHz. Como desventaja de esta configuración, el uso simultáneo de PS- FBG y FBGs ubicados en diferentes lugares de la topología no permite el empleo de este sistema para aplicaciones de detección basados en desplazamiento de longitud de onda. Por otra parte, esta topología puede ser utilizada en otras aplicaciones donde se requieran líneas estrechas de emisión SLM (single longitudinal mode según sus siglas en inglés) como por ejemplo en comunicaciones DWDM o espectroscopía de alta resolución.

4.1.7. Potencia umbral de acción del láser.

La potencia umbral de acción láser medido para estas líneas de emisión centradas en 1540, 1545, 1549,5 y 1552,5 nm han sido de 295, 257, 320 y 175 mW respectivamente, como se puede ver en la figura 4.1.22. Cabe destacar que cada una de estas líneas de emisión tiene un umbral de acción láser diferente debido a que estamos trabajando con varias longitudes de onda. Por otra parte, el rendimiento de cada línea de emisión depende en gran medida de las otras líneas de emisión, mostrando caídas repentinas de la potencia de pico debido a la competencia de ganancia entre las diferentes líneas cuando otra línea de emisión inicia su acción láser. Teniendo en cuenta que el sistema propuesto es un láser de cuatro longitudes de onda, la potencia mínima de bombeo necesaria para el correcto funcionamiento del sistema completo es de 320 mW. Este resultado concuerda con el estudio de la potencia umbral de la cavidad generada por cada línea de emisión de forma independiente, cuyo valor era de 80 mW (Fig. 4.1.23).

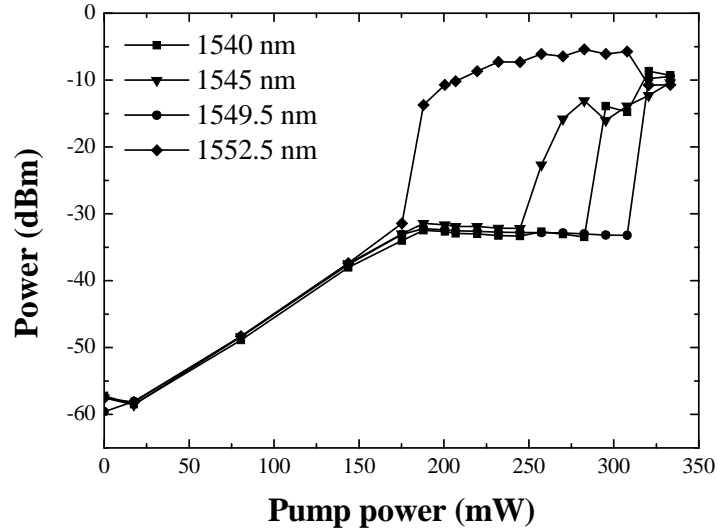


Fig. 4.1.22: Potencia umbral de acción de láser para las cuatro líneas de emisión conjuntas.

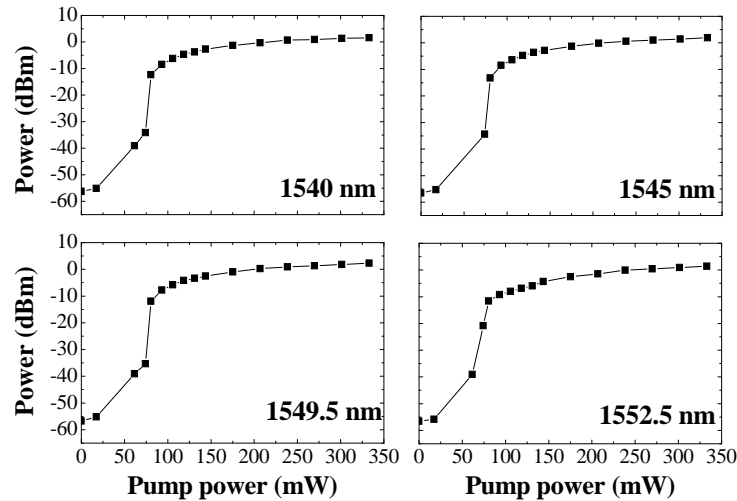


Fig. 4.1.22: Potencia umbral de acción de láser para las cuatro líneas de emisión independientes.

4.1.8. Estabilidad de las líneas de emisión

Por último se estudia la inestabilidad de las líneas de emisión obtenidas en función del tiempo. Esta medida experimental se llevó a cabo mediante la medición de la potencia de pico de cada línea de emisión cada minuto, durante treinta minutos, cuando el sistema de múltiples longitudes de onda está funcionando en el comportamiento monomodo. Como se demostró en artículos anteriores los láseres de anillo, con más de dos [37] o tres [38] líneas de emisión resultan inestables tanto en longitud de onda como en términos de potencia de salida. El presente experimento se llevó a cabo en espacios abiertos, por lo que la estabilidad de láser podría mejorarse aún más mediante el aislamiento del láser de perturbaciones ambientales o acortando la longitud de la cavidad.

Se puede observar en la Figura 4.1.23 que a temperatura ambiente la potencia de pico presenta una variación entre 0,87 y 1,15 dB, lo que muestra mejores resultados que otras estructuras similares analizadas anteriormente [39], [40].

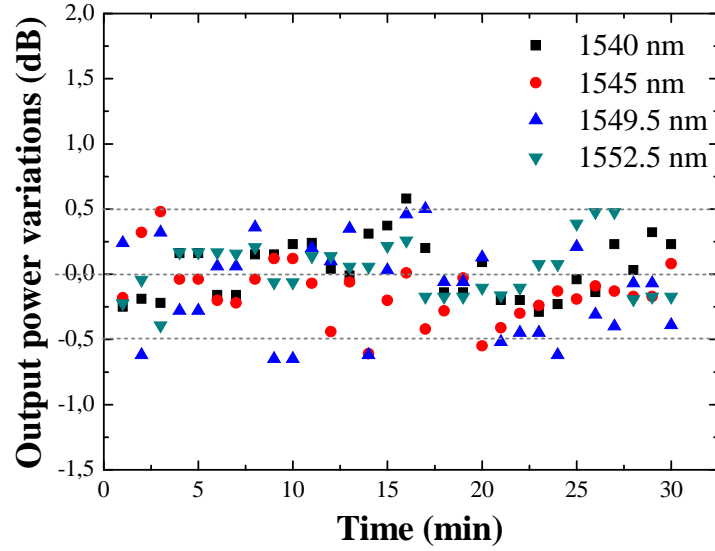


Fig. 4.1.23: Estudio de la estabilidad de la potencia de salida de la líneas de emisión en función del tiempo

4.2. Aplicaciones como sensor remoto mediante el uso de amplificación Raman

Con el fin de investigar la aplicabilidad de este sistema propuesto anteriormente en el apartado 4.1 (Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica mediante la introducción de PS-FBGs.) en el campo de aplicaciones como sensor remoto, se han realizado varias modificaciones de la estructura original.

La primera modificación es la extracción de los PS-FBGs, ya que como se ha explicado anteriormente, el uso simultáneo de PS-FBG y FBGs ubicados en diferentes lugares de la topología no permite el empleo del sistema para aplicaciones de detección basados en desplazamiento de longitud de onda. Por lo tanto en el nuevo montaje se trabajará únicamente con FBGs conectados en reflexión.

Otra modificación respecto al montaje anterior es la inclusión de un láser de bombeo Raman, es decir, un láser Raman que emite a 1445nm y es capaz de emitir hasta 3,2 W de potencia de salida, aunque finalmente la potencia de bombeo utilizada en este estudio experimental ha sido de aproximadamente 1,65mW.

Además de estas modificaciones, también se han ido introduciendo carretes de fibra óptica de diferentes longitudes en distintos lugares del montaje como se explicará a continuación. Las pruebas llevadas a cabo con diferentes longitudes de fibra así como su ubicación en diferentes puntos se debe a que al aumentar la longitud de la fibra se obtiene un mayor ganancia (hasta cierto límite), como se explica en el CAPÍTULO II apartado 2.2.3, donde la determinación del lugar correcto en el que deben situarse carretes de fibra es crucial para conseguir la ganancia adecuada para la ecualización de las diferentes líneas de emisión.

4.2.1. Análisis del sistema para diferentes longitudes de fibra óptica

El primer montaje realizado consiste en una cavidad en anillo en el cual tenemos un multiplexor - demultiplexor (MUX-DMUX) de cuatro canales con un ancho de banda por canal de 200 GHz utilizado para filtrar el ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission) generado por la amplificación mediante fibra dopada con erbio (EDFA). Esto mejora la eficiencia de amplificación y genera una respuesta espectral más plana. Los canales ITU utilizados por el MUX/DMUX son C31, C35, C41 y C47 que corresponden a las longitudes de onda 1552.52 nm, 1549.32 nm, 1544.53 nm y 1539.77 nm respectivamente. Además de utiliza un acoplador óptico del 95% para cerrar la cavidad desde donde se extrae la señal deseada para analizarla en el analizador de espectros óptico (OSA) con una resolución máxima de 0.01nm.

Asemejándose al montaje del apartado anterior (4.1), este montaje también incluye cuatro FBGs situados dentro de estos canales con las correspondientes longitudes de onda centrales de 1552.33 nm, 1549.6 nm, 1544.38 nm y 1539.9 nm. En cada canal se incorpora un atenuador óptico variable para permitir un ajuste preciso de las pérdidas de la cavidad para cada línea de emisión y así conseguir una mejor ecualización de las líneas de emisión generadas. Estos FBGs están situados a la salida número dos del circulador óptico, ya que son utilizados en reflexión; como se puede observar en la Figura 4.2.1, justo después del láser de bombeo Raman y del multiplexor por división de longitud de onda (WDM). En este primer montaje los cuatro FBGs están separados mediante carretes de fibra óptica con la intención de conseguir ganancia Raman como se explicó anteriormente. Con el objetivo inicial de conseguir cuatro sensores a diferentes distancias, se colocaron cuatro carretes de fibra óptica de 50, 25, 25 y 20 km respectivamente y cuatro FBGs centrados a 1539.9, 1549.6, 1544.38 y 1552.33nm entre ellos en ese mismo orden. .

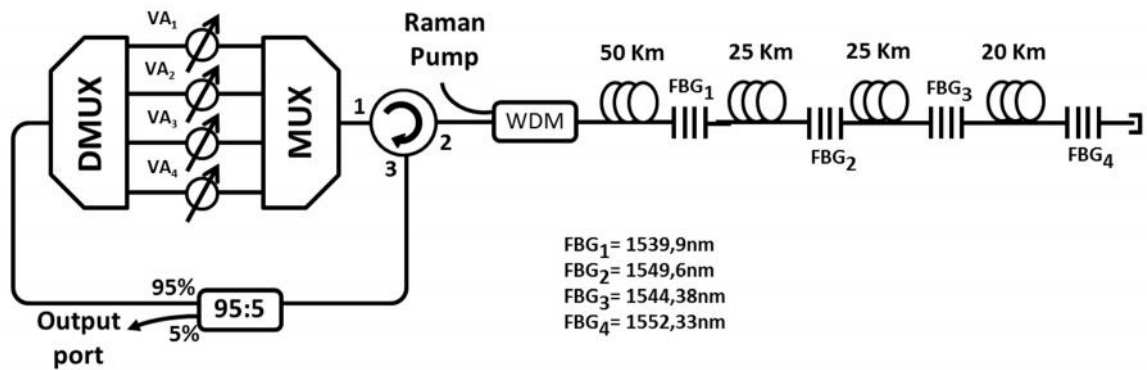


Fig. 4.2.1: Esquema del sistema para cuatro sensores 50+25+25+20 km.

Como resultado se observa que no llega suficiente potencia a los tres últimos FBGs, ya que el primero absorbe la mayoría, por lo que una de las soluciones es cambiar la distancia de la fibra óptica para así conseguir menos potencia en el primer FBG (longitud de onda 1539.9nm), intentando repartir así la potencia entre los siguientes. Para ello se cambia la configuración de esta parte del montaje, reduciendo el primer tramo de fibra óptica a 25 km para conseguir menos potencia en ese punto, y colocando después los carretes de 25, 50 y 20 km respectivamente. Este nuevo montaje se puede observar en la Figura 4.2.2.

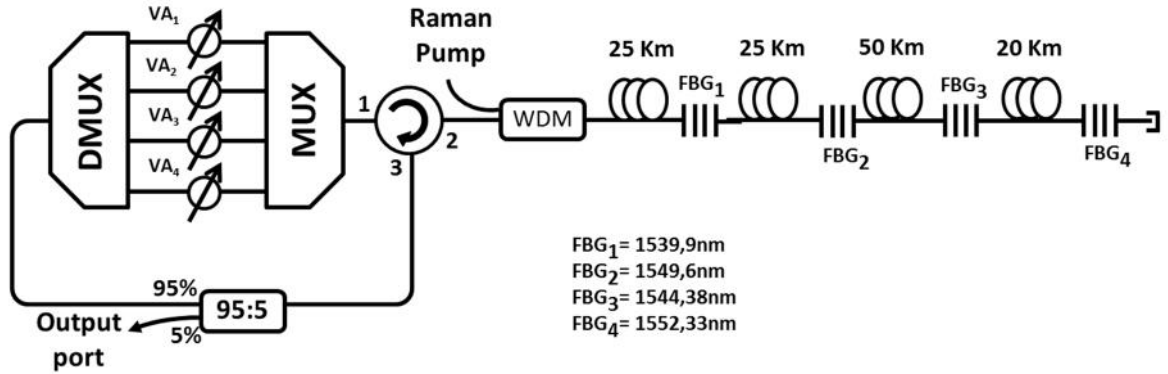


Fig. 4.2.2: Esquema del sistema para cuatro sensores 25+25+50+20 km.

El resultado obtenido no es el esperado ya que varía muy poco respecto al primer montaje realizado, obteniendo solamente la acción láser para el primer FBG. Se cree que el problema pueda ser causado por el FBG centrado a 1539.9nm, por lo que se realizara una nueva prueba sin dicho FBG.

4.2.2. Análisis del sistema con 50km

Debido a que los resultados obtenidos no son los esperados, se va a realizar un montaje más sencillo, dejando la parte del anillo como en los casos anteriores pero realizando cambios en la parte donde van situados los sensores ópticos. En este montaje se intenta evaluar la respuesta de 3 sensores situados a 50 km de distancia mediante los FBG 2, 3 y 4, en este caso sin utilizar el FBG a longitud de onda 1539.9nm, como se puede observar en la Figura 4.2.3.

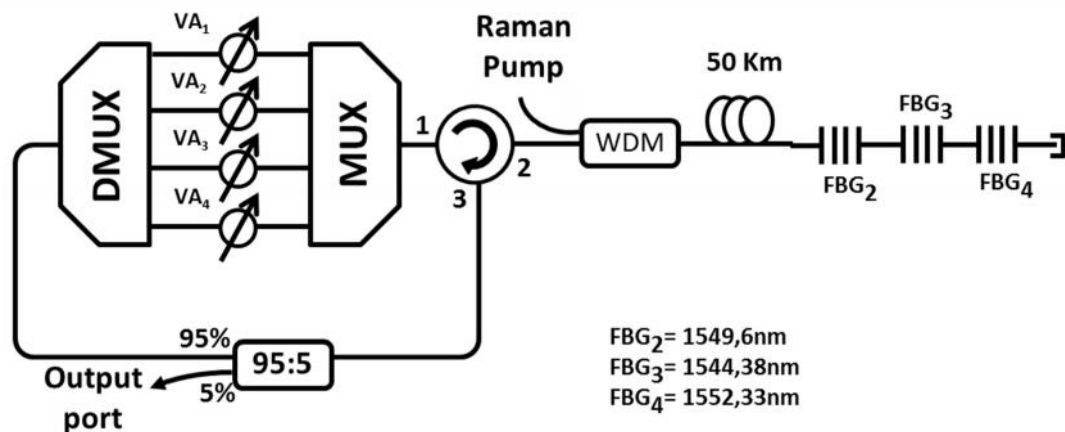


Fig. 4.2.3: Esquema del sistema para tres sensores localizados a 50 km.

El resultado obtenido es el esperado ya que se consiguen ecualizar las tres líneas de emisión con acción láser simultáneamente. Es mucho más sencilla la ecualización ya que a los tres FBGs les

llega aproximadamente la misma potencia óptica dado que todos ellos se encuentran separados la misma distancia del bombeo Raman, es decir, 50 kilómetros de fibra, por lo que con dicho bombeo obtendrán niveles de ganancia muy similares.

Una vez analizado este caso, se repite esta medida pero volviendo a incluir el FBG centrado a 1539.9, que es el que más ganancia tenía, después del último FBG. El esquema se puede ver en la Figura 4.2.4, y un ejemplo de cómo sería el resultado, con las cuatro líneas de emisión ecualizadas, se muestra en la Figura 4.2.5. Por lo tanto se llega a la conclusión de que sí que funciona correctamente como sensor a una distancia de 50 km con cuatro sensores centrados en diferentes longitudes de onda.

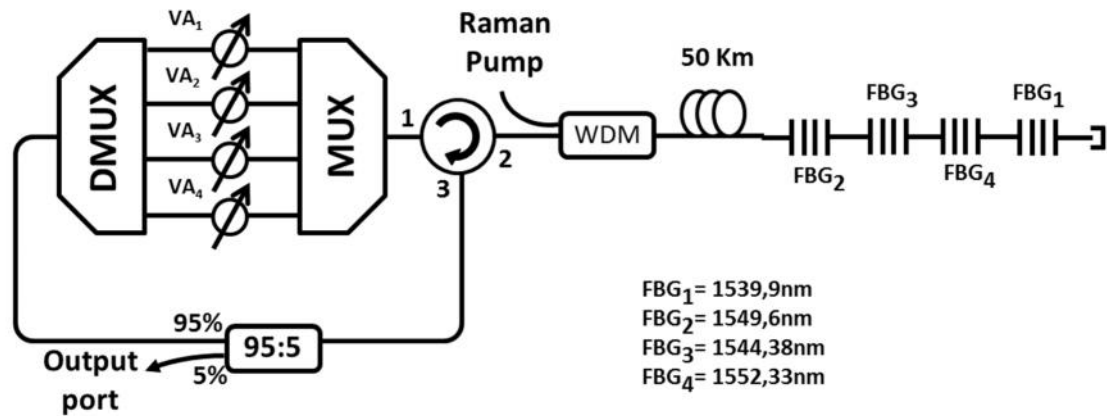


Fig. 4.2.4: Esquema del sistema para cuatro sensores localizados a 50 km.

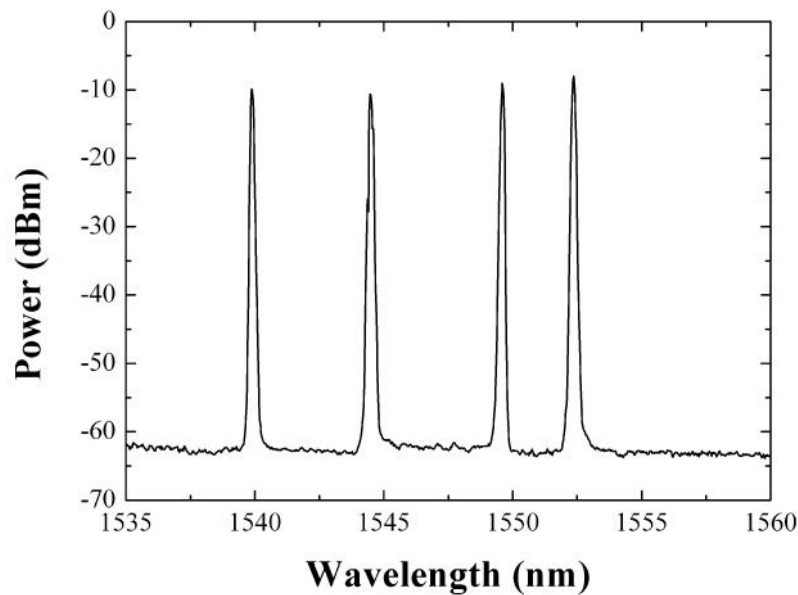


Fig. 4.2.5: Ejemplo de resultado del esquema de la figura 4.2.4.

4.2.3. Análisis del sistema con dos tramos de fibra óptica de 50 y 25km junto con fibra compensadora de dispersión (DCF)

El siguiente paso tras obtener los resultados del apartado anterior (4.2.2) es conseguir aumentar la distancia a la que se localizan los sensores. Por lo tanto, el primer paso será introducir un carrete de 25 km de fibra entre el segundo y el tercer FBG, o como se puede observar en la Figura 4.2.6, entre FBG₃ y FBG₄.

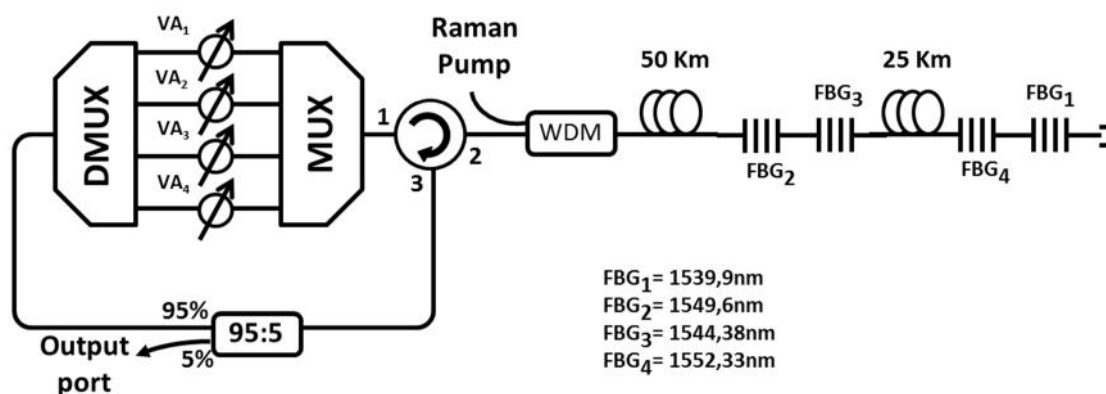


Fig. 4.2.6: Esquema del sistema para dos sensores situados a 50 km y otros dos a 75 km

El resultado obtenido es bastante optimista, ya que se consigue la ecualización de las cuatro líneas de emisión en acción láser, aunque con el pequeño inconveniente de que FBG₄ y FBG₁, es decir los dos componentes más alejados del bombeo, reciben una potencia muy justa para conseguir acción láser, y aunque resulta suficiente en este caso, con una mínima bajada o pérdida de potencia dejaría de funcionar correctamente.

Con la intención de conseguir una mejora para estos dos sensores más alejados, se introduce un tramo de fibra compensadora de dispersión (DCF). Una forma sencilla de compensar la dispersión introducida por un tramo de fibra consiste en colocar, otro tramo de fibra con características de dispersión opuesta, de forma que el efecto global sea el de compensar dicho efecto.

El lugar más indicado para utilización de la DCF es justamente antes de los dos últimos FBGs, para intentar compensar la dispersión introducida por los 25 km de fibra. La prueba se realiza situando la DCF delante y detrás del tramo de fibra óptica de 25 km, aun sabiendo que teóricamente serán iguales pero con la intención de demostrarlo, obteniendo lógicamente un resultado similar. Por ello se opta por situar la DCF entre los 25km de fibra y el FBG₄ como se puede observar en la Figura 4.2.7.

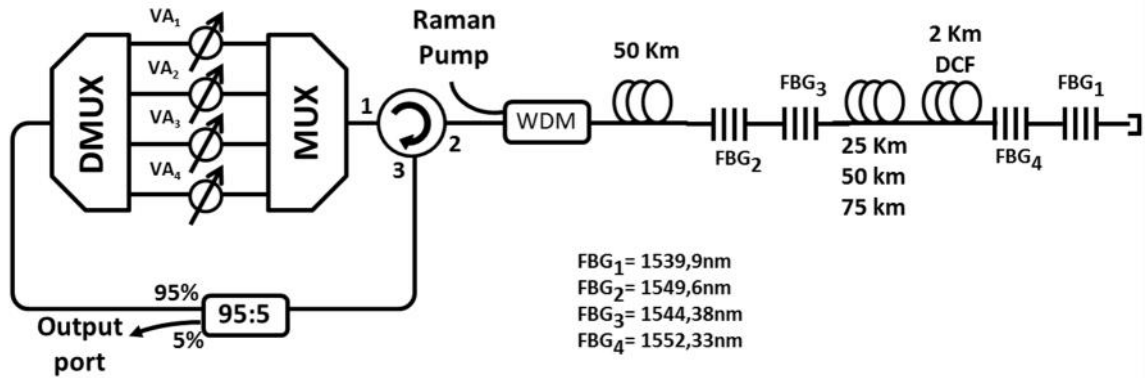


Fig. 4.2.7: Esquema del sistema para dos sensores situados a 50 km y otros dos sensores a 75, 100 o 125 km con el uso de fibra compensadora de dispersión (DCF)

Los resultados obtenidos demuestran que la utilizando fibra compensadora de dispersión mejoramos sensiblemente la línea de emisión centrada en 1552.33nm (generada por FBG₄), sin embargo no mejora o incluso se observa un pequeño empeoramiento, en la línea de emisión centrada a 1539.9nm, generados por el último FBG de la figura 4.2.7.

Es importante mencionar que estas pruebas se han realizado también con 50 y 75 km entre los dos primeros FBGs y los dos últimos, junto a la DCF, obteniendo mejores resultados que en el caso de utilizar únicamente 25 km. Para el caso de 50 km se consigue ecualizar las cuatro líneas de emisión mostrando una mayor estabilidad que en el caso de los 25 km, ya que la potencia en el punto más lejano, es decir 102 km (100 km de fibra estándar monomodo y 2 km de DCF), es mayor en los dos últimos FBGs. El utilizar 75 km entre los dos primeros y los dos últimos FBGs junto a la DCF no ofrece buenos resultados ya que la potencia que llega a los últimos FBGs (1552.33nm y 1539.9nm) no es suficiente para alcanzar la acción laser, sobre todo en el caso del FBG centrado en 1539.9nm, por lo que en esa longitud de onda solamente se observa el ruido producido por el bombeo Raman junto a la fibra.

Por último, y para comprobar la influencia de la DCF, se decide probar el los dos últimos casos sin dicha fibra para intentar simplificar y reducir el gasto derivado del montaje en la medida de lo posible. El resultado obtenido con o sin DCF es similar o incluso mejor en el caso de 100 km (2 tramos de 50km de longitud), por lo tanto se decide no utilizar la DCF en los siguientes apartados del montaje.

4.2.4. Análisis experimental del setup incluyendo fibra fuertemente dopada con erbio Er-30

Con la intención de mejorar los resultados conseguidos hasta el momento, se intenta aumentar el nivel de potencia para evitar el problema de los dos últimos FBGs. Para ello se realiza un estudio experimental utilizando fibra fuertemente dopada con erbio, modelo Er-30, de la empresa Liekki) antes del demultiplexor. También se utiliza un láser de bombeo centrado a 980nm dentro del anillo mediante un WDM, para amplificar la fibra fuertemente dopada con erbio, como se puede observar en la Figura 4.2.8. Con esto se pretende conseguir una ganancia en el anillo que, sumada a la ganancia obtenida por el láser de bombeo Raman, permita una correcta ecualización de las cuatro líneas de emisión.

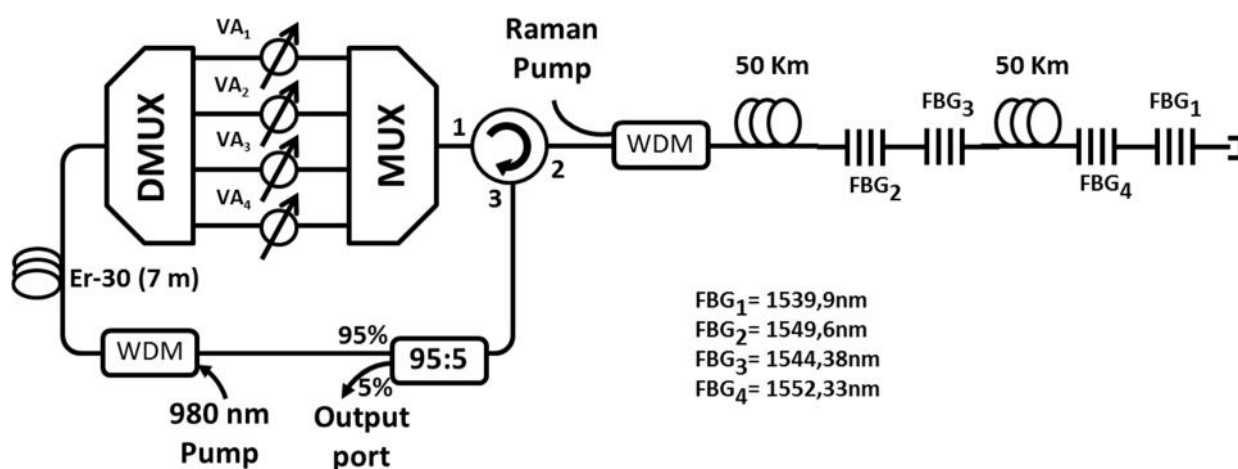


Fig. 4.2.8: Esquema del sistema para dos sensores situados a 50 km y otros dos a 100 km mediante el uso de fibra fuertemente dopada (Er-30) en el anillo.

Tras analizar estos resultados vemos como mejora la potencia que le llega al FBG₄ y FBG₁, sin embargo la inestabilidad de las otras líneas de emisión también aumenta. Esta inestabilidad es tal que no se consigue la emisión de las cuatro líneas de emisión simultáneamente (únicamente emiten las líneas centradas en 1544.38nm y 1549.6nm, es decir, las correspondientes a los dos primeros FBGs del montaje, o a las líneas de emisión a 1552.33 nm y 1539.9 nm, pero nunca las cuatro al mismo tiempo). Por lo tanto queda descartada la opción del uso de fibra fuertemente dopada con erbio, ya que en este caso nos impide su utilización como sensor remoto.

4.2.5. Análisis del sistema con dos tramos de fibra óptica de 50 km

Tras analizar los apartados anteriores, se llega a la conclusión de que el mejor esquema es el estudiado en el apartado 4.2.3 pero con un tramo de 50km de fibra óptica situado entre cada par de FBGs, es decir, el obtenido con dos sensores situados a una distancia de 50 km y otros dos sensores a 100 km.

Cabe destacar la facilidad para generar líneas de emisión en torno a los 1552.33nm (mayor que para longitudes alrededor de 1539.9nm) Esto puede ser debido a que, como se ha explicado en el CAPÍTULO II apartado 2.2.3, al utilizar un láser de bombeo Raman, la máxima ganancia se genera en torno a los 100nm por encima de la longitud de bombeo. En nuestro caso, el láser de bombeo utilizado estaba centrado en 1445nm por lo que a la longitud de onda de 1539.9nm no tendríamos una ganancia máxima. Una posible solución a este problema sería situar este FBG a 50 km de distancia junto al FBG de 1544.38nm, colocando a 100km de distancia los otros FBGs. Esta configuración se puede observar en la Figura 4.2.9.

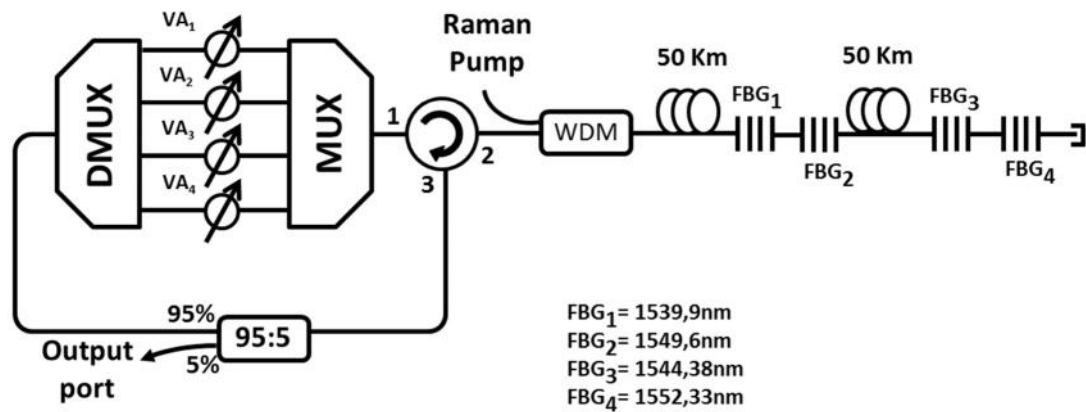


Fig. 4.2.9: Esquema del sistema para dos sensores situados a 50 km y dos sensores a 100 km.

Los resultados obtenidos en este caso se pueden observar en la Figura 4.2.10. En dicha figura se puede apreciar cómo se han conseguido ecualizar las cuatro líneas de emisión como sensores remotos. Sin embargo cabe remarcar el hecho de que en este caso, los FBG₃ y FBG₄ situados a 100 km de distancia reciben una potencia menor, lo que se traduce en una mayor dificultad para generar sus líneas de emisión.

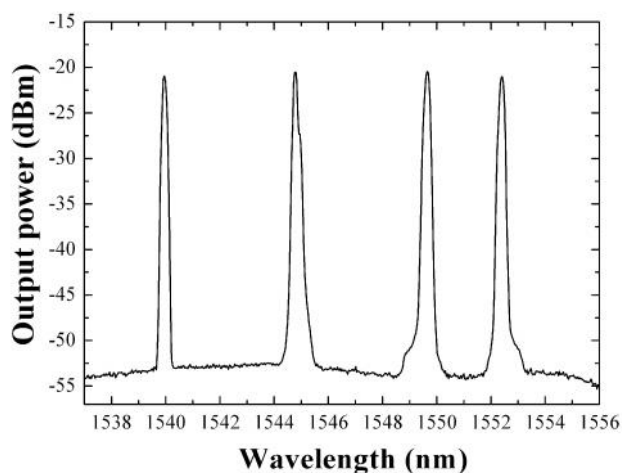


Fig. 4.2.10: Espectro óptico de salida del sistema para dos sensores a 50 km y dos sensores a 100 km.

Como se puede observar en la Figura 4.2.10, la potencia obtenida de cada uno de los canales de salida es de alrededor de -20 dBm y estas cuatro líneas de emisión muestran una OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) de aproximadamente 30 dB, lo que muestra una mejora significativa en comparación con los resultados previos que se presentan en sistemas de sensores remotos similares [33], [34].

Además de estos estudios previos, se intenta aprovechar la potencia residual que llega del bombeo Raman, centrado a 1445nm, después de los 50 primeros kilómetros introduciendo un tramo de 7 metros de fibra fuertemente dopada con erbio. También se realiza la misma prueba antes de los FBGs situados a 100km de distancia. Para evaluar la ubicación correcta de dicho tramo de fibra dopada con erbio se realizan pruebas mencionadas, debido a que la fibra Er-30 también obtiene ganancia en las longitudes de onda deseadas con un láser de bombeo a 1445nm. El resultado obtenido demuestra que el uso de esta fibra dopada con Erbio introduce más pérdidas en el sistema que la ganancia que genera, por lo que desaconseja su uso en la estructura.

4.2.6. Sensores de temperatura

El siguiente objetivo es utilizar los FBGs como sensores remotos de temperatura, para ello se utiliza una cámara climática en la cual se introducen los FBGs uno a uno y mediante la variación de la temperatura en dicha cámara se analiza la respuesta de dichos sensores. El rango de temperatura analizado va desde los 25°C, es decir desde temperatura ambiente, hasta 87°C. En la figura 4.2.11 se observa el esquema con el FBG centrado en 1552.33nm sometido a variaciones de temperatura dentro de la cámara climática. Hemos escogido el FBG más alejado del receptor con el fin de simular la respuesta del sensor en la posición más crítica.

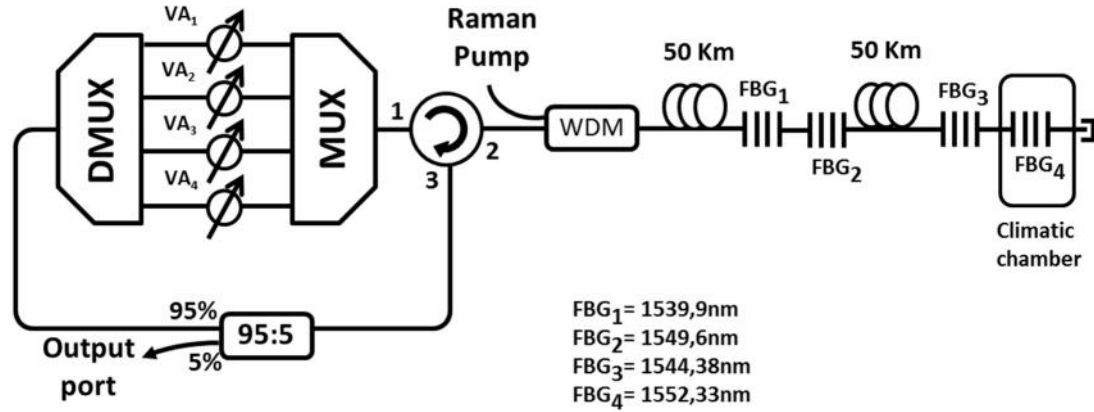


Fig. 4.2.11: Esquema del sistema para dos sensores situados a 50 km y dos sensores a 100 km con cámara climática.

En el primer intento para observar la respuesta en temperatura se decide ir aumentando la temperatura 5°C cada minuto, estimando que es el tiempo suficiente para que la temperatura se estabilice. Una vez obtenidas todas las medidas se extraen los datos y se analizan de tal manera que el resultado obtenido es el que se observa en la Figura 4.2.12.

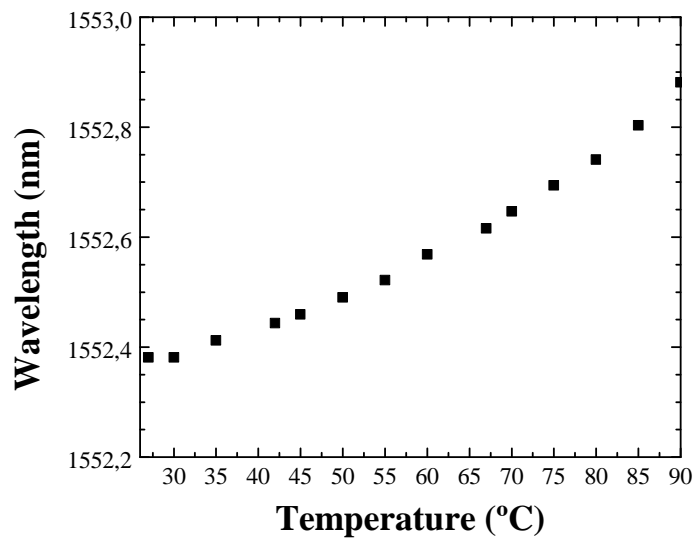


Fig. 4.2.12: Variación de la longitud de onda de emisión en función de la temperatura. El tiempo de espera entre medidas consecutivas fue de alrededor de 1 minuto.

Como se puede observar en la Figura 4.2.12, la respuesta obtenida no es tan lineal como debería de haber obtenido. La causa de este problema podría estar en el encapsulamiento de los FBGs, por lo que su calentamiento no es inmediato, y el tiempo de espera entre las medidas puede no ser suficiente.

Este estudio fue nuevamente llevado a cabo con un tiempo de espera entre medidas consecutivas de unos 10 minutos, manteniéndose el aumento de temperatura de 5 °C por medida. Este nuevo resultado se puede observar en la figura 4.2.13.

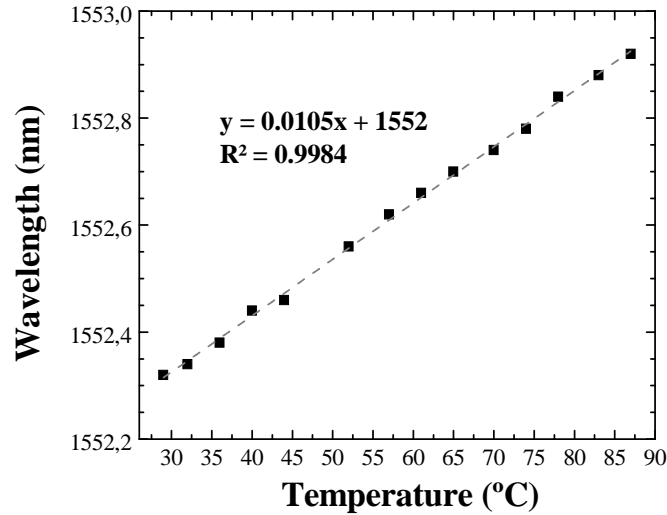


Fig. 4.2.12: Variación de la longitud de onda de emisión en función de la temperatura. El tiempo de espera entre medidas consecutivas fue de alrededor de 10 minutos. Respuesta en temperatura de la línea de emisión a 1552.33nm con tiempos de espera suficiente.

En esta ocasión la respuesta de temperatura respecto a la longitud de onda presentan un comportamiento mucho más lineal, al igual que en los otros tres sensores de temperatura, midiéndose una sensibilidad a la variación de la temperatura de aproximadamente 10pm/°C. Esta figura muestra la variación de la longitud de onda del láser generado en torno a 1552.33nm, el que está situado lo más lejos posible del receptor, para simular la respuesta del sensor en la posición más alejada.

Como se indicó en [23], teniendo en cuenta esta sensibilidad a la temperatura y la respuesta espectral plana de 200GHz DWDM utilizado en el trabajo experimental, se pudo medir un rango de temperatura de alrededor de 135°C y, en función de la emisión de longitud de onda central de los FBGs utilizados para esta configuración, estos valores de temperatura podrían variar. Los resultados indican la escalabilidad de esta red para su utilización con un mayor número de sensores. Además, los sensores pueden estar situados en cualquier punto de la fibra debido al control independiente de las pérdidas para cada canal de transmisión MUX/DMUX. Esta característica supera una desventaja importante en láseres de múltiples longitudes de onda para aplicaciones de sensores remotos, si la comparamos con otras técnicas propuestas que requieren que los sensores que se encuentran en puntos específicos de la fibra, habitualmente en el extremo del canal [33], [34], [35], [36].

4.2.7. Anchura de línea

Para medir la anchura de línea se sigue el mismo procedimiento realizado en el montaje anterior 4.1 en su apartado 4.1.6, añadiendo una extensión a la estructura realizada a partir de la salida del 5% del acoplador 95:5. A esa salida se conecta un acoplador de 50% por todas sus puertas, conectándolo a 2 kilómetros de fibra por una de las salidas para conseguir un retardo y a un modulador de fase (POM, Avanex IM10 - P) en combinación con un generador de RF (Rohde & Schwarz SMT02) a 1Ghz en la otra para conseguir la modulación deseada, conectando la salida de estos dos últimos a otro acoplador 50:50. Se utiliza un filtro sintonizable (2 nm FWHM) para seleccionar la línea de emisión a medir. Por último, para medir los datos obtenidos, se conectarán a este último acoplador un BOSA y un ESA.

El las Figuras 4.2.13 y 4.2.14 se observan la anchura de línea medida mediante el ESA para los canales 47 y 41 respectivamente, mostrando un ancho de banda de unos 8,7 GHz y 5,6 GHz que, al estar situados a 50 km tienen una menor anchura de línea que los situados a 100km. La anchura de línea de los canales 35 y 31 son de aproximadamente 17,5 GHz y 16,4 GHz como se puede observar en las Figuras 4.2.15 y 4.2.16, En este caso, las líneas de emisión ya no tienen un comportamiento monomodo debido a la elevada longitud de esta nueva cavidad.

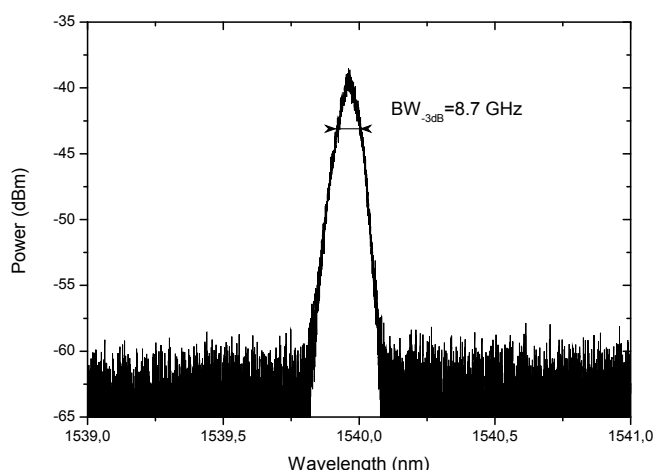


Fig. 4.2.13: Anchura de línea del canal 47 centrado en 1539.9nm.

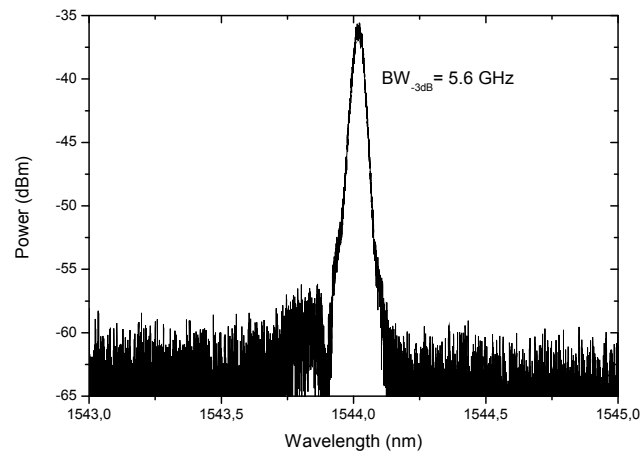


Fig. 4.2.14: Anchura de línea del canal 41 centrado en 1544.38nm.

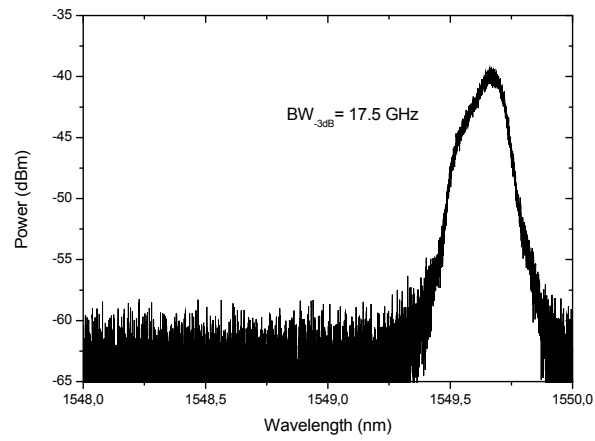


Fig. 4.2.15: Anchura de línea del canal 35 centrado en 1549.6nm.

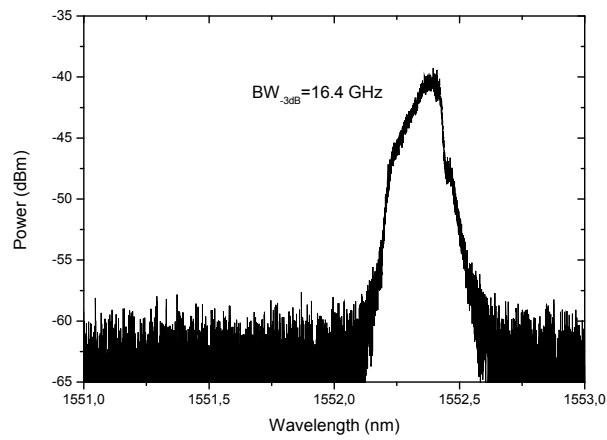


Fig. 4.2.16: Anchura de línea del canal 31 centrado en 1552.33nm.

4.3. LUNA: comportamiento de componentes y mejora de resolución.

Este apartado requiere en primer lugar el estudio y aprendizaje del manejo y funcionamiento del LUNA OBR 4600. Este reflectómetro óptico proporciona una capacidad de inspección y diagnóstico sin precedentes para la industria de la fibra óptica, proporcionando el aislamiento y detección de fallos, ahorrando horas de trabajo y un deterioro del rendimiento. Al ser el líder en resolución espacial con $10\ \mu\text{m}$ y sin dejar zonas muertas, determina con exactitud las pérdidas de la fibra debido a posibles curvaturas, fusiones defectuosas, etc... Además la opción de detección distribuida ofrece una visión más completa de lo que está sucediendo en el sistema.

El software ofrece una gran cantidad de opciones, separadas en dominio del tiempo o en dominio de la frecuencia. En el dominio del tiempo, la amplitud es equivalente a una tradicional medición de reflectometría en dominio de tiempo óptico (OTDR). En cambio, la amplitud en el dominio frecuencial proporciona medidas de pérdida de retorno o retardo de grupo del sistema. La información de fase en el dominio de la frecuencia se utiliza para calcular el retardo de grupo.

Una vez realizado el aprendizaje se realiza la caracterización de las diferentes redes de difracción de Bragg disponibles en el laboratorio, tales como FBGs, PS-FBGs o FBGs chirpeados mediante el reflectómetro óptico de LUNA, y dada la necesidad para la observación a una mayor resolución debido a que los cambios de índice de refracción en el núcleo de un FBG son cada aproximadamente $1\ \mu\text{m}$, se realiza la propuesta de cómo aumentar prácticamente la resolución del LUNA OBR 4600. Con esta propuesta se propone una mejora de la resolución máxima de $10\ \mu\text{m}$ a $0.2\ \mu\text{m}$, siempre dependiendo de la fiabilidad de los microposicionadores como se explicará más adelante.

4.3.1. Caracterización de FBG, PS-FBG y FBG chirpeado con reflectómetro óptico

Para la caracterización de los diferentes redes de difracción de Bragg disponibles en el laboratorio mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600 simplemente se debe conectar mediante una fibra óptica el componente deseado al reflectómetro óptico, como se puede observar en la Figura 4.3.1.

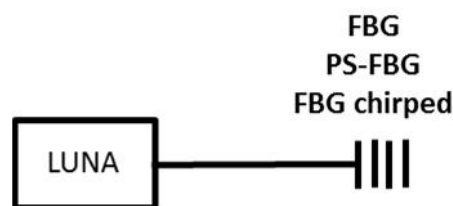


Fig. 4.3.1.: Esquema caracterización componentes.

Una vez realizada la medida, se pueden observar gráficamente los datos obtenidos o pueden exportarse parcialmente o en su totalidad. El inconveniente que se obtiene al intentar tratar todos los datos obtenidos con programas como Excel u Origin es que al tener una elevadísima cantidad de datos, estos programas no son capaces de trabajar con ellos. Por ello, una vez realizada la medida, es conveniente realizar una ampliación de la zona deseada para después extraer esos datos y poder tratarlos. Como ejemplo se muestra en la Figura 4.3.2 la traza obtenida al medir un FBG conectado mediante un metro de fibra óptica estándar monomodo al LUNA OBR 4600.

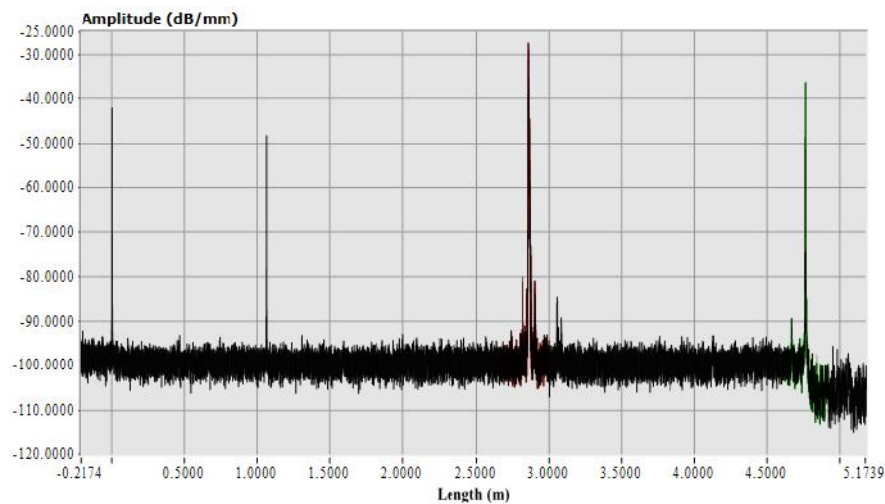


Fig. 4.3.2.: Traza obtenida mediante LUNA OBR 4600 de un FBG

Como se puede observar en la figura 4.3.2 en la distancia de 0 metros se obtiene el primer pico de reflexión que es debido al conector del reflectómetro, similar al caso que se obtiene a aproximadamente a un metro de distancia, con otro pico de reflexión que es debido al conector de la fibra de 1 metro. A la distancia de 2.865 metros se puede observar el FBG conectado, el cual en la Figura 4.3.3 se observa ampliado, y por último se observa a 4.75 metros de distancia aproximadamente el final de la fibra del conector del FBG.

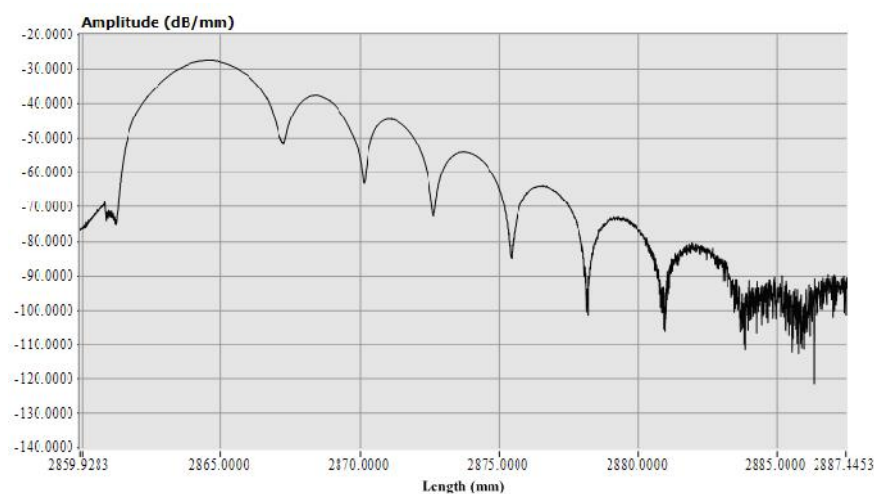


Fig. 4.3.3.: Amplitud de un FBG respecto a la distancia

FBG

Como se ha explicado en el CAPÍTULO II, una red de difracción es un tramo de pequeña longitud (1mm-20cm) de fibra óptica monomodo al que se le introduce una perturbación periódica en el índice de refracción del núcleo con el objetivo de producir una transferencia selectiva en longitud de onda entre los modos fundamentales que se propagan en sentidos contrarios en una guía óptica.

En este caso el FBG está centrado en la longitud de onda de 1534nm y la longitud es de aproximadamente 2 cm, medido a la resolución máxima, es decir, 10 μm . Dichas características, como la longitud física del FBG, se puede observar en la figura 4.3.3, ya que empieza aproximadamente en 2860mm y finaliza poco después de 2880mm donde empieza el ruido. En cuanto a la forma de la amplitud respecto a la distancia se puede observar como tiene un gran lóbulo principal donde se consigue una gran reflexión respecto a la amplitud y a continuación tiene otros lóbulos más estrechos de aproximadamente 2.5 mm los cuales van disminuyendo en amplitud con la distancia. Debido a que la resolución no es suficientemente buena, además de que los cambios en el índice son muy pequeños, no se puede observar en cada lóbulo esos pequeños cambios de índice de refracción del núcleo de la fibra, lo cual se intentará más adelante con el estudio de la mejora de resolución anteriormente mencionado.

En la Figura 4.3.4 se puede observar la derivada de la fase en distancia respecto a la longitud de onda en la posición donde se encuentra el FBG. En ella se observa como la longitud de onda se centra en 1534nm, es decir, exactamente donde se centra el FBG, mientras que en el momento en el que ya no se encuentra en el FBG (2883mm aproximadamente) la derivada de la fase oscila entre 1525 y 1610nm aleatoriamente, debido a la baja potencia recibida a esa distancia.

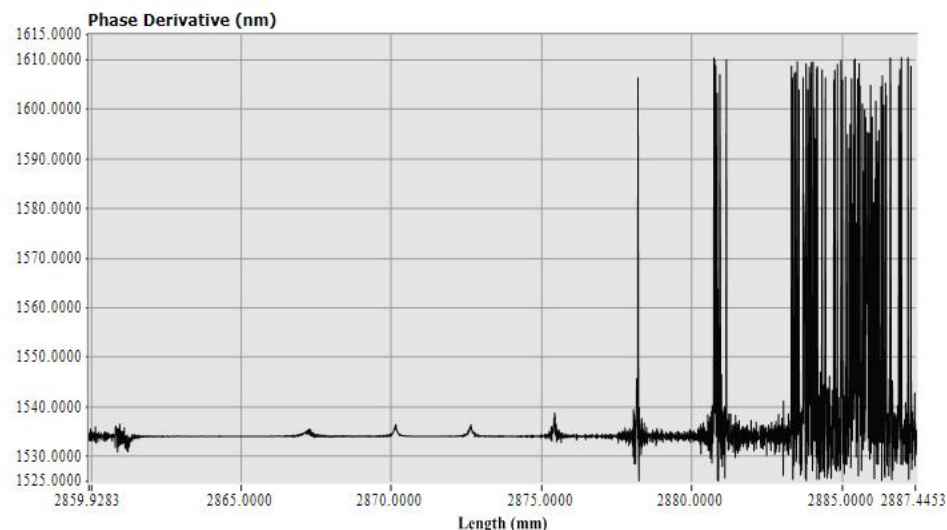


Fig. 4.3.4.: Zoom de la derivada de la fase de un FBG respecto a la distancia

PS-FBG

La red de difracción con cambio de fase (Phase Shifted Fiber Bragg Grating), como se ha explicado y como su nombre indica, es un FBG con cambio de fase π en las variaciones periódicas del índice de refracción. En este caso el PS-FBG está centrado también en 1534nm con una achura física de aproximadamente 5cm como se observa en la Figura 4.3.5, donde se visualiza el PS-FBG en amplitud respecto a la distancia desde 2075mm a 2125mm. En este caso no se obtienen los lóbulos en la bajada en amplitud durante toda la longitud como en el caso del FBG, sino que se obtienen unos primero máximos en amplitud y después una bajada constante.

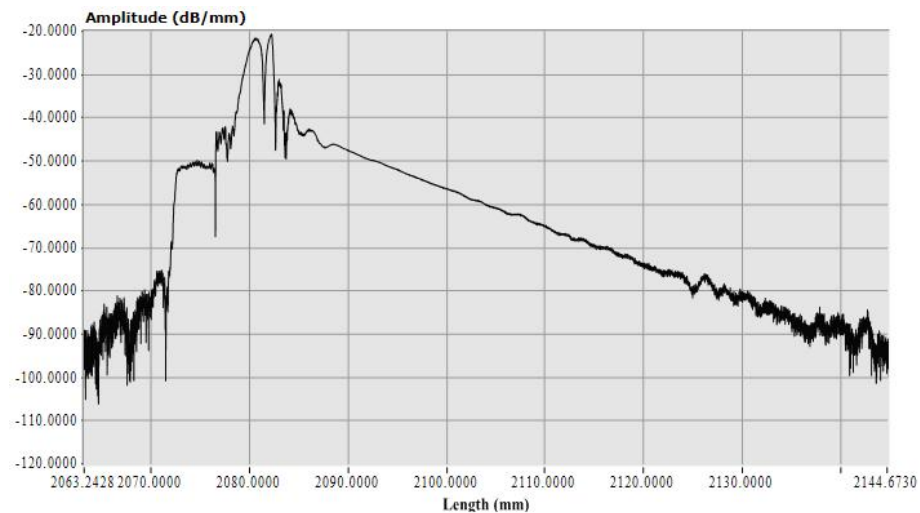


Fig. 4.3.5.: Zoom de la amplitud de un PS-FBG respecto a la distancia

En cuanto a la derivada de la fase su medición con LUNA OBR 4600 da unos resultados similares al FBG como se puede observar en la Figura 4.3.6.

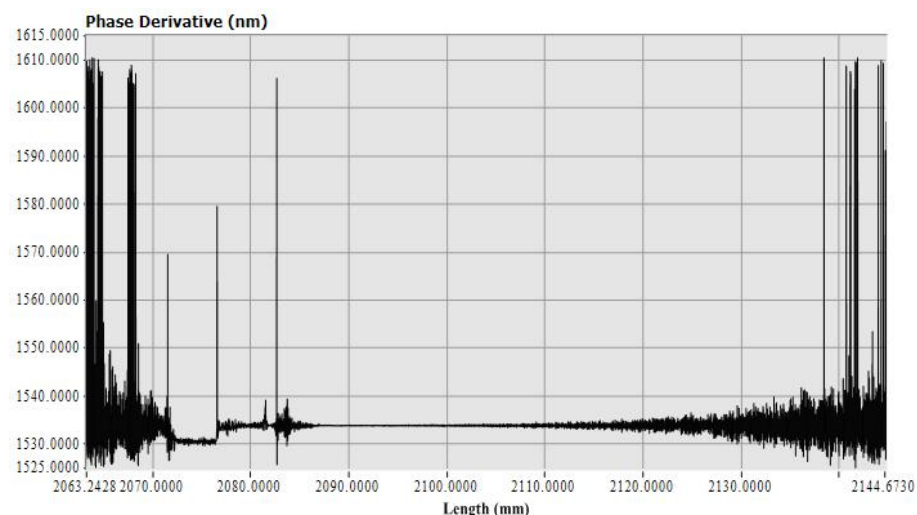


Fig. 4.3.6.: Zoom de la derivada de la fase de un PS-FBG respecto a la distancia

FBG chirpeado

Los FBG chirpeados son dispositivos que pueden emplearse para compensar la dispersión cromática. Como se ha explicado anteriormente, un FBG es una sección de fibra en el que el índice de refracción del núcleo varía periódicamente. En el caso de los FBG chirpeados, el periodo de variación cambia a lo largo del FBG. Esto provoca la reflexión de distintas longitudes de onda en puntos distintos dentro del dispositivo, por lo que se introduce un retardo diferente para cada componente frecuencial. Dado que en general, cuando se trabaja en tercera ventana, la dispersión cromática motiva retardos mayores para las componentes de baja frecuencia, puede diseñarse un FBG que haga lo opuesto, es decir, que introduzca retardos mayores en las componentes de alta frecuencia, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4.3.7.

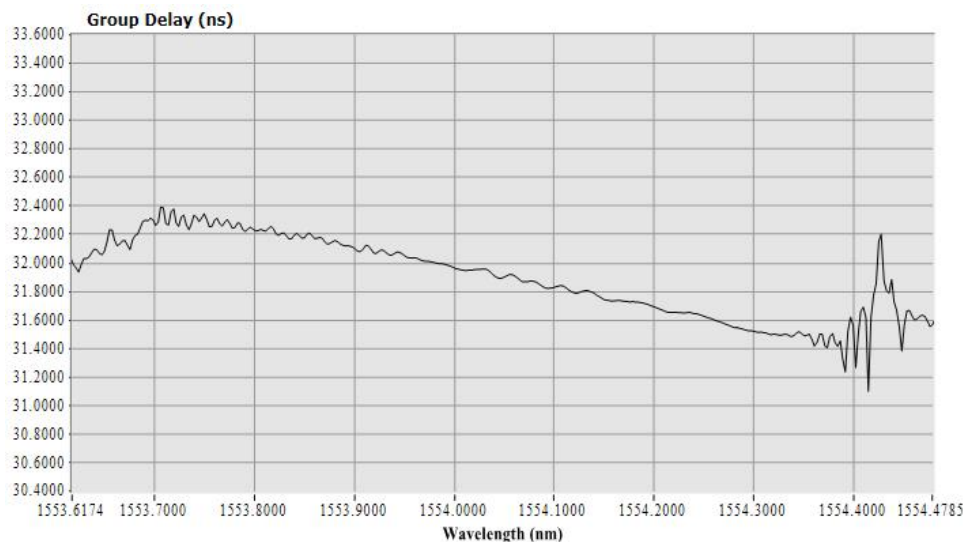


Fig. 4.3.7.: Retardo de grupo de un FBG chirpeado

El FBG chirpeado que se ha seleccionado está centrado en la longitud de onda de 1554nm y tiene una longitud física mucho mayor que las redes de difracción de Bragg estudiadas, alcanzando los 14cm como se puede observar en la Figura 4.3.8. Se puede observar que su amplitud respecto a la distancia tiene un amplitud máxima continua durante aproximadamente 8cm, disminuyendo seguidamente hasta alcanzar el ruido.

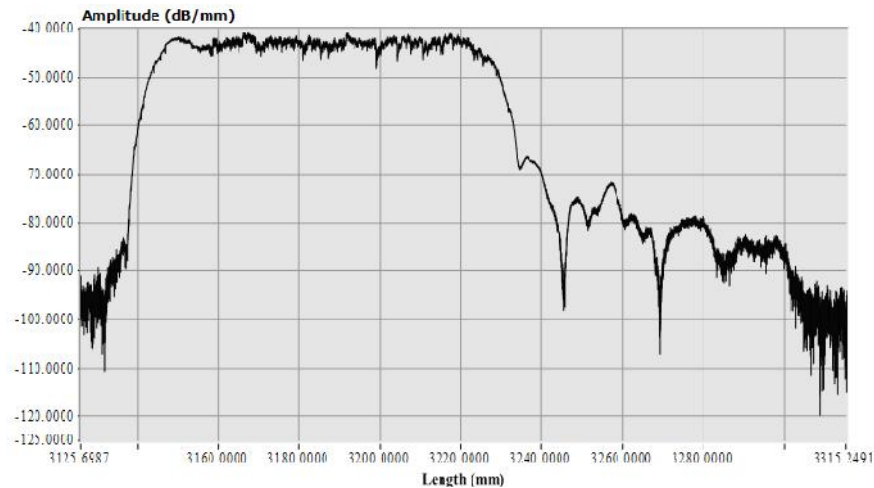


Fig. 4.3.8.: Amplitud de un FBG chirpeado

En cuanto a la derivada de la fase, cuya grafica se puede visualizar en la Figura 4.3.9, se puede observar cómo se centra en 1553nm cuando la amplitud es máxima, mientras que en el momento en el que esa amplitud disminuye, la variación de la longitud de onda va aumentando en longitudes de onda entre 1550nm y 1560nm, para ser aleatorio entre 1525nm y 1610nm cuando se finaliza el FBG físicamente al igual que pasaba en casos anteriores.

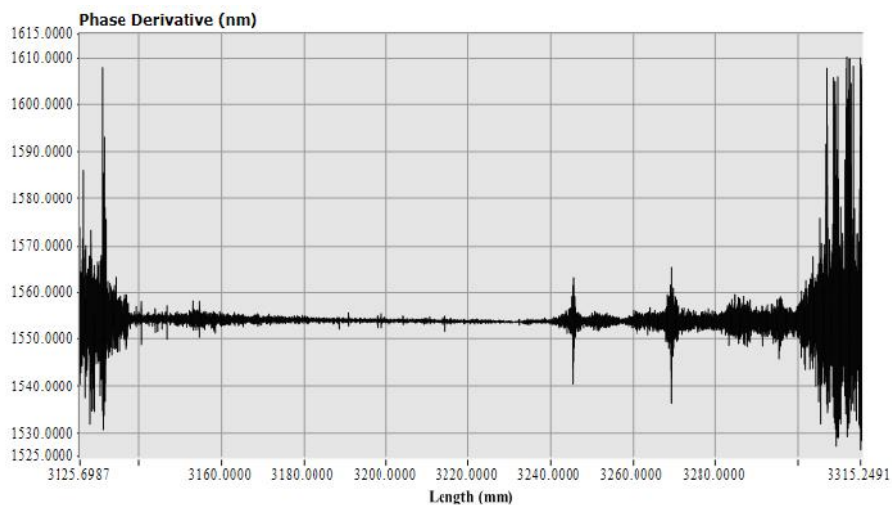


Fig. 4.3.9.: Zoom de la derivada de la fase de un FBG chirpeado respecto a la distancia

Es destacable que también se han observado tanto las polarizaciones como las pérdidas de retorno y retardos de grupo de las diferentes redes de difracción de Bragg, pero al no ser tan relevantes para el estudio deseado no se expone en la memoria.

Una vez finalizada la caracterización de las diferentes redes de difracción de Bragg, se va a realizar el estudio de la propuesta para aumentar la resolución del LUNA OBR 4600 para intentar observar en más detalle los cambios de índice de refracción en el núcleo de dichos FBGs. Esta mejora de resolución también serviría para un futuro estudio del comportamiento del hole-burning espacial en fibra dopada con erbio.

4.3.2. Mejora de resolución con Waveshaper

Como se ha mencionado anteriormente, la resolución máxima que se puede obtener con LUNA OBR 4600 es 10 μ m, pero para observar gráficamente el cambio de índice de refracción en el núcleo de una red de difracción de Bragg se necesitaría una resolución en torno a 0.5 μ m, ya que los cambios de índice de refracción se realizan cada 750 nm aproximadamente. Esto es debido a que por el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe de ser al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta de la señal que se quiere reconstruir.

El primer intento de mejora de resolución se realizara mediante un filtro óptico programable, concretamente con Waveshaper. Mediante este dispositivo se pueden generar filtros ópticos diseñados por el usuario mediante el software WaveManager. En este caso se ha utilizado para retardar la señal generada por el LUNA, con el fin de introducir los retardos deseados en cada instante y conseguir en el rango de 10 μ m un mínimo de 20 medidas, consiguiendo así una resolución mínima de 0.5 μ m.

Para ello lo primero que se ha de comprobar es que Waveshaper es capaz de introducir un retardo de al menos 0.5 μ m, ya que si no se diese el caso, no serviría para el estudio. La opción que ofrece el programa para introducir retardo a una señal es en tiempo y no en distancia, con el mínimo retardo de 0.001ps. Por lo tanto se pasa a distancia con el fin de comprobar que sea menor de 0.5 μ m

$$\text{Índice de refracción del nucleo} = n_1 = 1.48$$

$$\text{Velocidad de la luz} = 3 * 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad de la luz en el núcleo de la fibra} = \frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{1.48} = 2.027 * 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Retardo} = 0.001 * 10^{-12} \text{ s} * 2.027 * 10^8 \text{ m/s} \approx 0.2 \mu\text{m}$$

Por lo tanto el retardo, al ser 0.2 μ m menor que 0.5 μ m, es válido para realizar el estudio.

El montaje realizado para introducir el retardo mediante Waveshaper consiste en, como se puede observar en la Figura 4.3.10, conectar de la salida del LUNA mediante el puerto 2 al circulador, el puerto 3 del circulador se conecta al Waveshaper para introducir los retardos, y de la salida del Waveshaper al puerto 1 de otro circulador. Del puerto 2 de este segundo circulador se conecta la red de difracción de Bragg deseada, en este caso un FBG centrado en 1534nm, para que por el puerto 3 del segundo circulador llegue la señal con el FBG en reflexión y se conecte, con un atenuador entre ellos, al puerto 1 del primer circulador, consiguiendo que la señal circule por una rama y vuelva al LUNA mediante la otra. Es necesario que la señal una vez reflejada no vuelva hacia LUNA por el mismo lugar donde se sitúa Waveshaper, ya que este tiene un aislador que no permite circular la señal en el sentido inverso.

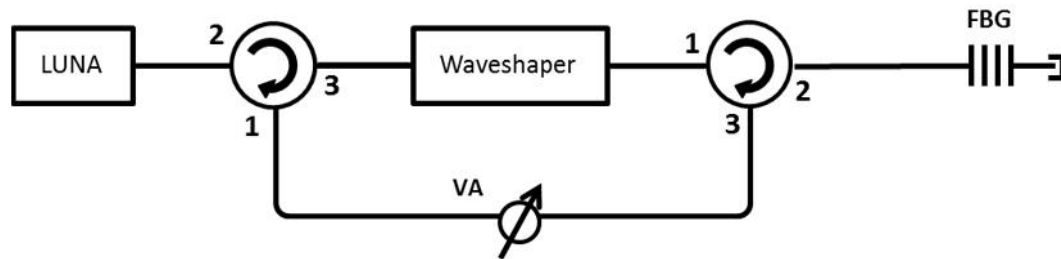


Fig. 4.3.10.: Esquema introducción retardo con Waveshaper

La primera prueba, para comprobar su funcionamiento, se realiza introduciendo un retardo de 0.5ps mediante Waveshaper, o lo que es lo mismo, un retardo de 100 μ m en distancia, y comparándolo con la muestra tomada anteriormente sin retardo. El resultado no es el esperado ya que no se realiza el retardo deseado, esto puede ser debido a que al no ser el retardo físico sino que lo realiza Waveshaper virtualmente, LUNA no lo detecte por su método de medida. LUNA OBR 4600 utiliza interferometría mediante el barrido de la longitud de onda, para interrogar el sistema deseado, siendo dicho barrido frecuencial en forma de diente de sierra como el que se puede observar en la Figura 4.3.11, recorriendo todas las frecuencias y obteniendo los resultados espaciales tras realizar la transformada de Fourier de los datos frecuenciales reflejados. Por lo tanto, al hacer el promediado de los datos obtenidos para varios barridos, el retardo no se muestra ya que no tiene una longitud real.

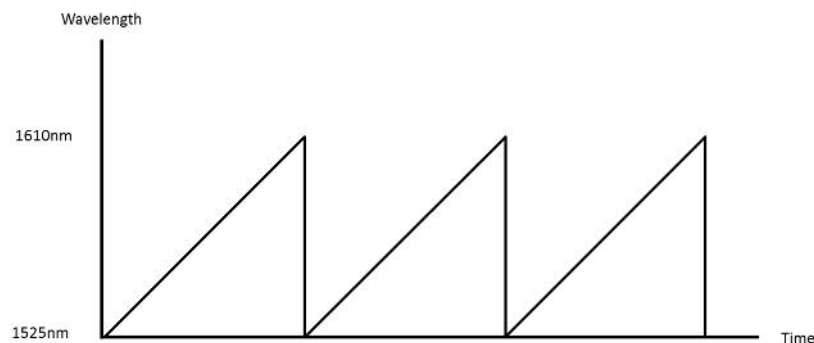


Fig. 4.3.11.: Barrido frecuencial en forma de diente sierra.

Como conclusión se demuestra que introduciendo un retardo temporal mediante Waveshaper no es posible una mejora de la resolución, por lo tanto se opta a introducir como alternativa un retardo físico mediante el estiramiento de la fibra.

4.3.3. Mejora de resolución utilizando microposicionadores.

Debido a que la prueba del retardo con Waveshaper no funcionó correctamente, se propone aplicar el retardo mediante estiramiento de la fibra óptica. Para ello se utilizarán microposicionadores con una precisión de 17nm controlados mediante ordenador. Esta resolución es muy superior a la necesaria para conseguir una resolución mínima de $0.5\mu\text{m}$. Al realizar el estiramiento de la fibra se consigue aumentar la distancia de esta, teniendo en cuenta que dicho estiramiento debe de ser mínimo para no modificar la señal que circula por la fibra óptica por cambios de la birrefringencia, etc.

Lo primero que se debe de hacer, para comprobar que verdaderamente introduce dicho retardo, es realizar una prueba y comparar los resultados iniciales con los resultados después del estiramiento (y por lo tanto retardo) introducido. Para la realización de la prueba se realiza un sencillo montaje en el cual se conecta desde el reflectómetro LUNA un tramo de fibra pelada pegado a un microposicionador mediante pegamento epoxi (es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador), para finalmente conectar la red de difracción de Bragg, como se puede observar en la Figura 4.3.12.



Fig. 4.3.12.: Esquema introducción retardo con microposicionadores

Al estar fijada la fibra al microposicionador, una vez tensada, se realiza una medida inicial la cual se toma de referencia, después se realizan otras tres medidas con estiramiento de $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, y $150\mu\text{m}$ mediante el microposicionador. Mediante este proceso se comprueba que dicho estiramiento realiza un retardo en la señal correspondiente a la distancia aumentada en el microposicionador, tomando este montaje como válido para conseguir los retardos deseados. El resultado se puede comprobar en la Figura 4.3.13, destacando que se ha tomado a la resolución máxima de $10\mu\text{m}$.

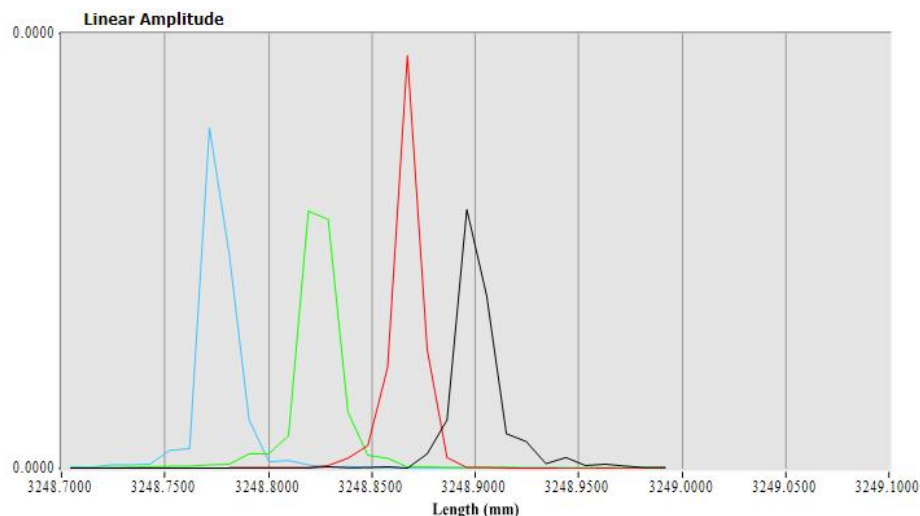


Fig. 4.3.13.: Resultado de retardo de 50 μm , 100 μm , y 150 μm mediante microposicionadores

La propuesta de la mejora de la resolución se basa en la premisa de que LUNA integra la potencia de la señal reflejada en una celda de tamaño igual a la resolución (como mínimo 10 μm). De esta manera un retardo físico (desplazamiento) de una distancia menor a la resolución supone un traspaso de potencia de un punto de resolución al siguiente. Si esta variación de potencia tras el desplazamiento se computa es posible calcular la potencia para cada desplazamiento. Por lo que para desplazamientos de distancia menor a la resolución podría obtenerse una mejora de esta. Lo que se quiere conseguir, por lo tanto, es introducir retardos mínimos para conseguir, como se puede ver en el ejemplo explicado, esos puntos intermedios que no se obtienen solamente con LUNA OBR 4600.

Un ejemplo explicativo muy sencillo es el siguiente (Figura 4.3.14). Suponemos una única reflexión de potencia -10dB para la posición 1026 μm de anchura 1 μm (señal azul en el diagrama). Con una resolución de 10 μm LUNA detectará ruido para todas las muestras menos para la correspondiente a 1020-1030 μm que será -10dB (puntos rojos en diagrama). Si aplicamos un estiramiento de 2 μm y repetimos la medida sería equivalente a alejar la reflexión 2 μm por lo que LUNA de nuevo detectará ruido para todas las muestras menos para la correspondiente a 1020-1030 μm que seguirá siendo -10 dB (ya que a efectos la reflexión se encuentra en 1028 μm , Figura 4.3.15). Por lo tanto teniendo en como muestra inicial Si repetimos sucesivamente el proceso, cuando el desplazamiento aplicado sea de 4 μm todas las muestras obtenidas por LUNA serán nulas menos la correspondiente a 1030-1040 μm , por lo que la señal reconstruida para ese desplazamiento (puntos verdes en el diagrama) representará un valor de -10 dB (Figura 4.3.16). En el siguiente desplazamiento al no haber variaciones el punto generado en la reconstrucción volverá a ser nulo (Figura 4.3.17) y así sucesivamente. En definitiva, sobre un punto inicial se podría en principio reconstruir la señal con un aumento de resolución dado por el desplazamiento mínimo de los microposicionadores (Figura 4.3.19).

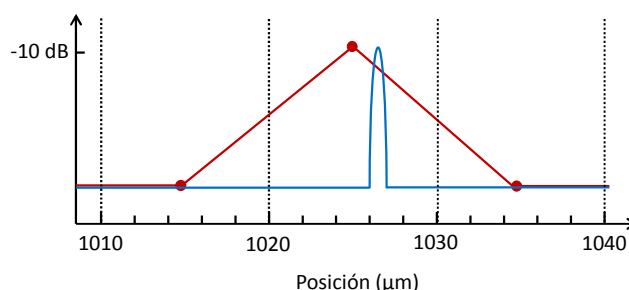
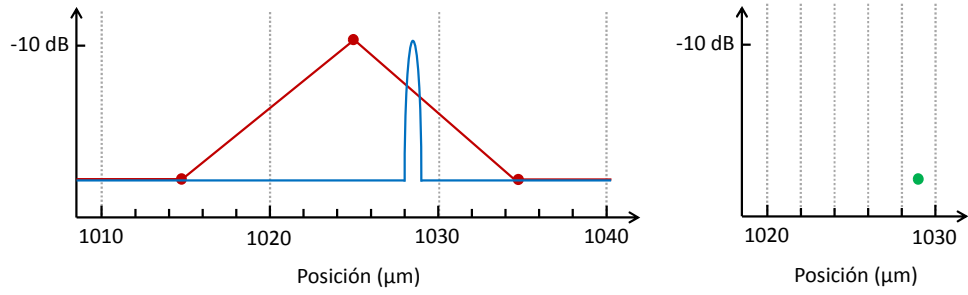
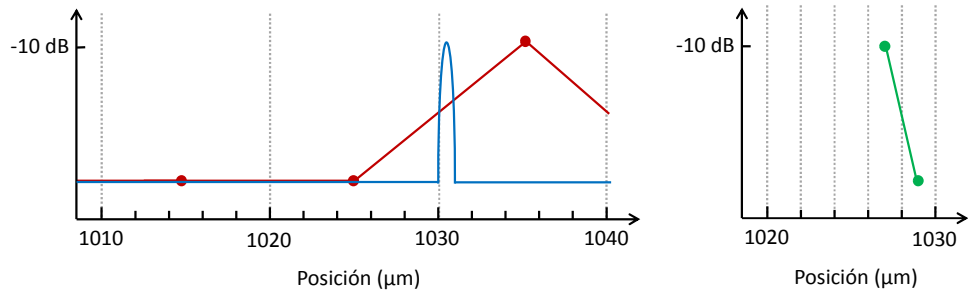
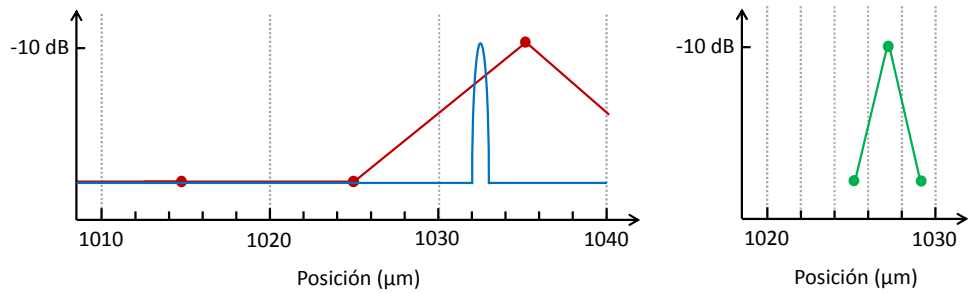
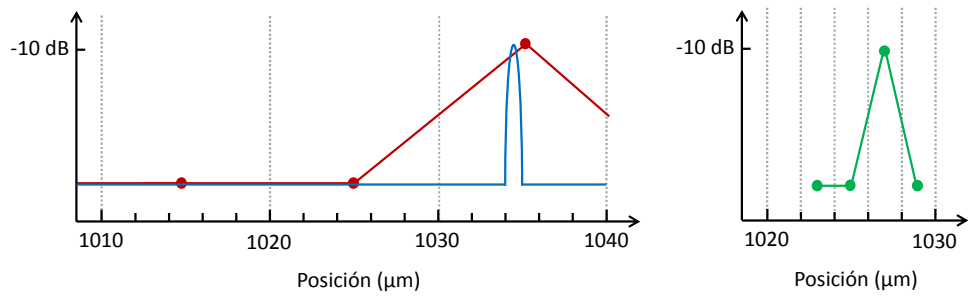


Fig. 4.3.14.: Señal real (azul) y señal detectada con LUNA (rojo)

Fig. 4.3.15.: Señales tras aplicar un desplazamiento de $2\mu\text{m}$ Fig. 4.3.16.: Señales tras aplicar un desplazamiento de $4\mu\text{m}$ Fig. 4.3.17.: Señales tras aplicar un desplazamiento de $6\mu\text{m}$ Fig. 4.3.18.: Señales tras aplicar un desplazamiento de $8\mu\text{m}$

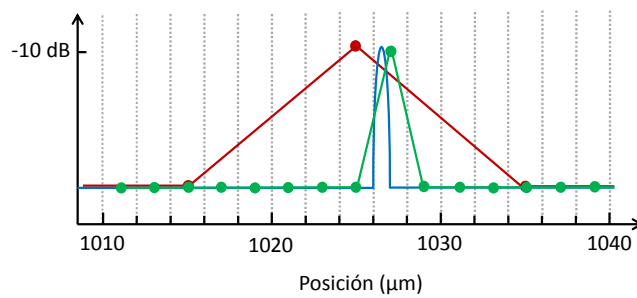


Fig. 4.3.19.: Señales real, detectada por LUNA y reconstruida

Inicialmente se ha creado un programa mediante Matlab para poder tratar los datos obtenidos. Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de dicho programa, se ha realizado una prueba inversa, es decir, de una señal de muestra creada por el programador, recrear como la analizaría LUNA OBR 4600. A partir de estas muestras (que simulan las obtenidas por el reflectómetro óptico) reconstruir la señal original.

Para ello se ha creado mediante Matlab la señal que se observa en la Figura 4.3.14.

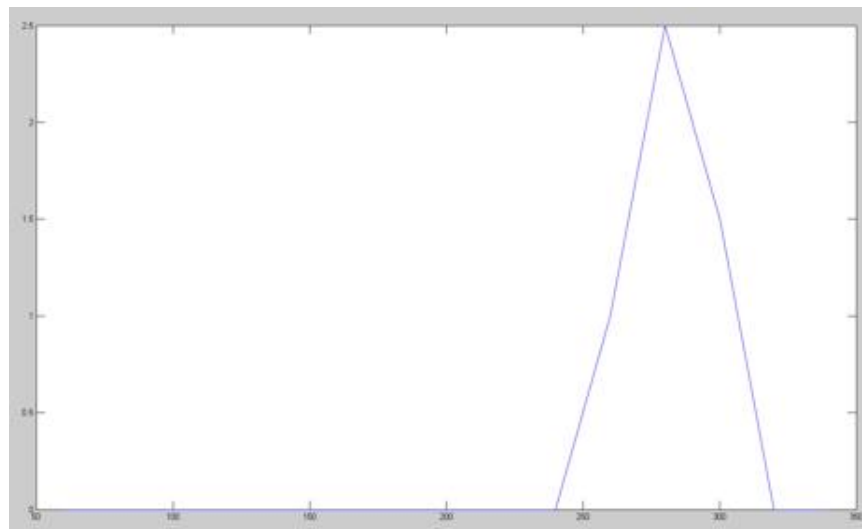


Fig. 4.3.14.: Señal creada mediante Matlab

Mediante dicha señal, realizando suma de amplitudes, se han recreado las señales que LUNA OBR obtendría, como se puede observar en la Figura 4.3.15. Se muestran solamente cuatro muestras como ejemplo ya que desde la primera señal (roja) hasta la cuarta (gris), se observan las muestras intermedias que obtiene mediante la integración de amplitudes abarcadas.

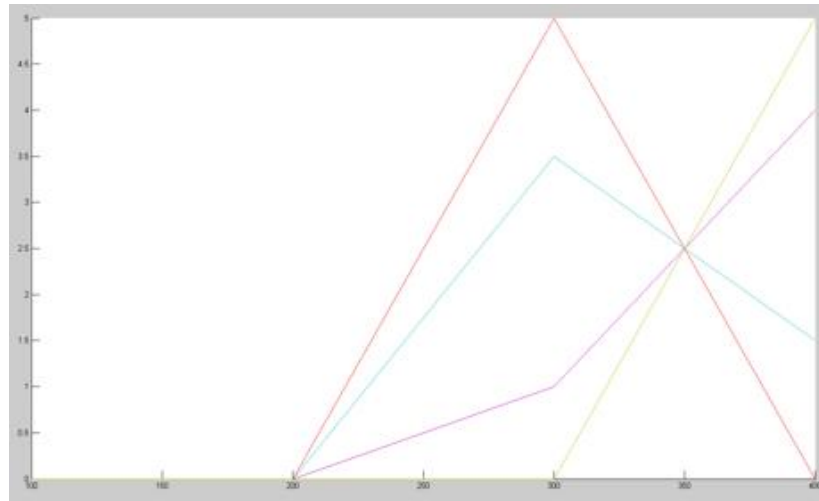


Fig. 4.3.15.: Señal recreada simulando el comportamiento de LUNA OBR 4600 mediante Matlab

Una vez obtenido el ejemplo de la señal que se quiere tratar, se pasa a reconstruir la señal original mediante las señales que simulan lo obtenido con LUNA OBR 4600. En la Figura 4.3.16 se observan las muestras que simulan al reflectómetro junto a la señal reconstruida (azul).

La diferencia de amplitud de las muestras a reconstruir respecto a la reconstruida no es relevante, ya que dicha suma se debe a la integración de todas las muestras que abarca dicha muestra con menor resolución.

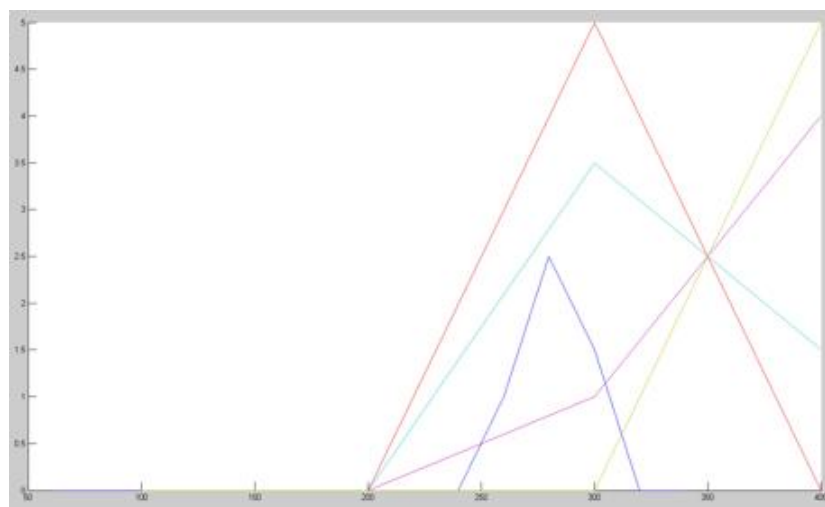


Fig. 4.3.16.: Señales simulando medida de LUNA OBR 4600(roja, cian, morado, gris) junto a señal reconstruida (azul)

Tras estas pruebas simplemente para comprobar correcto funcionamiento del programa de Matlab, y con el mismo proceso de estiramiento explicado y visualizado en la figura 4.3.12, se realizan nuevas medidas con el fin de demostrar la posibilidad de mejora de resolución de LUNA OBR 4600. En este nuevo caso se realizara mediante el reflectómetro óptico una bajada de resolución de $10\mu\text{m}$ a $40\mu\text{m}$, realizando cuatro medidas durante los $40\mu\text{m}$, es decir, una medida cada $10\mu\text{m}$. Esta disminución de la resolución es simplemente por el hecho de que el estiramiento se realizará de manera manual.

Con esto se consiguen cuatro puntos intermedios entre la posición inicial y el estiramiento de $40\mu\text{m}$ (con resolución de $40\mu\text{m}$), que se podría extrapolar al caso de máxima resolución ($10\mu\text{m}$) y los puntos intermedios que se desean conseguir como objetivo final. Pero en este caso con la ventaja de que además de realizar la medida con la resolución de $40\mu\text{m}$ también se realiza con la resolución máxima de $10\mu\text{m}$, pudiendo demostrar que los datos que se obtienen después de tratado son similares a los de máxima resolución, y por lo tanto es válida la manera de obtener esa resolución de $0.5\mu\text{m}$ deseada.

En la Figura 4.3.17 se observa las medidas obtenidas mediante LUNA OBR 4600, con un total de 12 medidas, cada una de ellas con un estiramiento de $10\mu\text{m}$. En ella se observa como las muestras, conforme van obteniendo retardos debido al estiramiento, van perdiendo amplitud (muestras situados en 2766.46), mientras que aumenta dicha amplitud en las muestras situadas en 1766.51. Es destacable que en el tránsito entre una muestra y la otra se observan 2 muestras (azul y verde) en las cuales no existe un pico de amplitud marcado, siendo justamente las que marcan la transición.

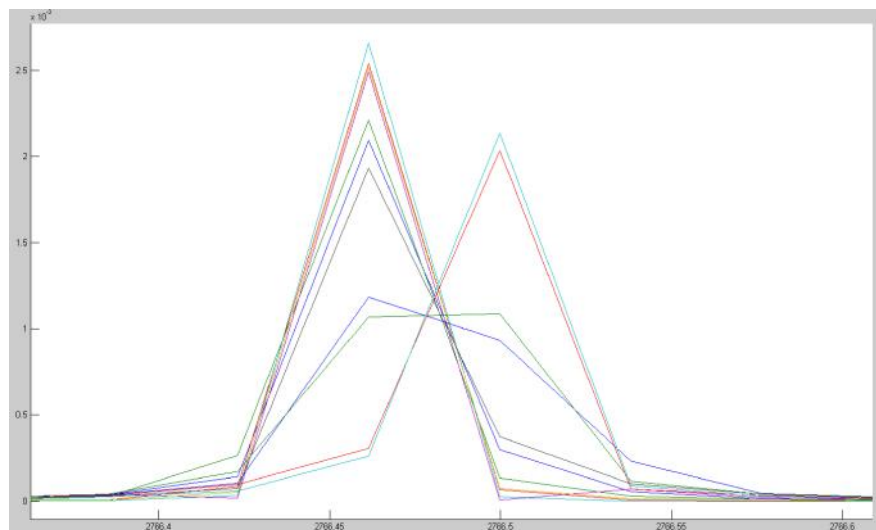


Fig. 4.3.17.: Muestras obtenidas mediante LUNA OBR 4600 con resolución de $40\mu\text{m}$

En la Figura 4.3.18 se muestra la señal reconstruida junto a las señales originales de LUNA. Dicha señal se muestra en color azul con una amplitud inferior al las otras muestras, que como se ha explicado anteriormente, es debido a que las señales obtenidas mediante el reflectómetro son el area que integra de esa señal.

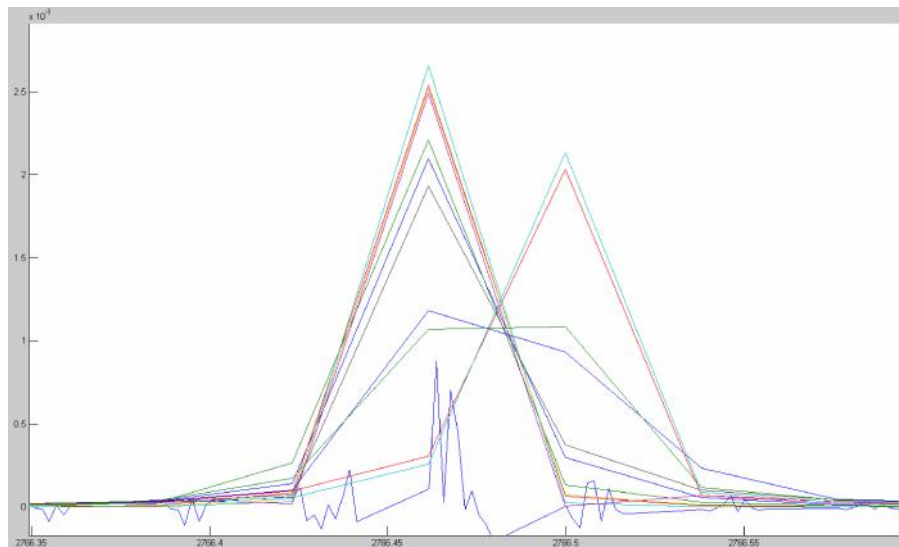


Fig. 4.3.18.: Muestras obtenidas mediante LUNA OBR 4600 con resolución de 40 μ m junto a reconstrucción a mayor resolución.

Por último, se puede observar en la Figura 4.3.19, una comparación de la muestra original obtenida mediante LUNA junto a la reconstrucción a mayor resolución obtenida después de hacer todo el proceso explicado.

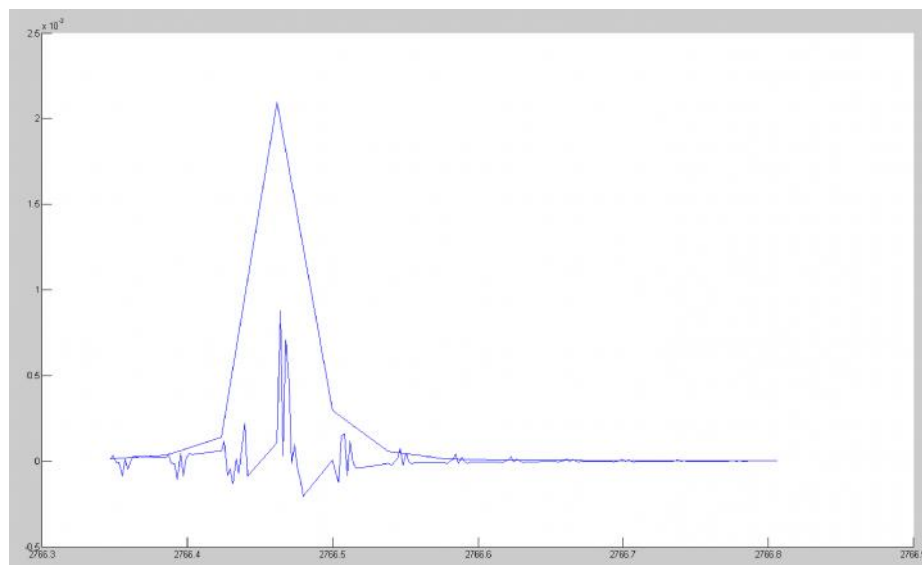


Fig. 4.3.19.: Comparación de una muestra obtenida mediante LUNA OBR 4600 con la obtenida con la mejora de resolución

Es destacable que las imperfecciones en las medidas pueden ser debido a que los desplazamientos han sido aplicados manualmente, y sin ningún tipo de promediado. Las inestabilidades pueden ser debidas principalmente a la imprecisión de los microposicionadores o incluso a las vibraciones de la mesa, pero al menos se demuestra como la reflexión de la señal original ha podido localizarse en un punto más preciso de la fibra.

Junto con el grupo de Comunicaciones Ópticas se está diseñando un programa mediante Matlab para controlar LUNA OBR, y así poder programar las medidas realizadas con el reflectómetro. Como se explicara en líneas futuras, con este programa se conseguiría realizar un promediado de gran cantidad de medidas en cada estiramiento de aproximadamente $0.017\mu\text{m}$ (precisión máxima aproximada de los microposicionadores), y mejorar así la precisión. Estas medidas se realizaran utilizando una mesa óptica anti-vibraciones en horario nocturno, evitando que puedan influir las posibles vibraciones de los demás dispositivos del laboratorio, así como cualquier otra interacción externa.

Por lo tanto queda propuesto que es posible realizar la mejora de resolución de LUNA OBR 4600 hasta resoluciones limitadas por el estiramiento mínimo, teniendo en cuenta que se es dependiente de la precisión de los microprocesadores y de la posible inestabilidad. La continuidad del estudio queda en manos del grupo de Comunicaciones Ópticas con el que se ha trabajado durante todo el año.

4.4. Estudio de consecución de líneas de emisión monomodo mediante LUNA OBR

Los láseres en anillo de fibra dopada con Erblio para operar en régimen monomodo de manera estable son fuentes muy útiles para muchas aplicaciones de caracterización de fibra óptica, redes de multiplexación de sensores y test de instrumentos. Estos láseres tienen muchas ventajas, como su estructura simple, anchura de línea estrecha y compatibilidad con otros componentes de fibra óptica [12]. Estos láseres normalmente generan muchos modos longitudinales alrededor de la longitud de onda central del láser debido al gran tamaño de la cavidad. Esto puede limitar sus aplicaciones prácticas debido a la competición entre modos y el salto intermodal (*mode hopping*). Conseguir en estas estructuras la operación monomodo ha sido el objetivo de muchos y variados estudios [41], [42].

Para el objetivo de este estudio es necesario realizar un montaje en el cual se obtengan dos longitudes de onda operando simultáneamente aproximadamente a la misma amplitud para que pase a operación monomodo. Por lo tanto, para realizar dicho montaje, se ha basado en el artículo “*Stabilization of Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Ring Lasers by Single-Mode Operation*” [43], con algunas modificaciones, para así obtener el resultado deseado y poder analizarlo mediante LUNA OBR 4600.

4.4.1. Láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda

En primer lugar se estudiara un montaje similar al del artículo [43] con el fin de conseguir dos líneas de emisión monomodo operando simultáneamente. La configuración del láser está basada en la conexión en serie de FBG utilizando circuladores ópticos. El medio activo de amplificación es fibra dopada con Erblio y la selección de las dos longitudes de onda se realiza mediante dos FBGs situados en 1539.9nm y 1544.38nm con una reflectividad del 98%. La fibra dopada con Erblio es de la casa Liekki Er-30 con una absorción de 30 dB/m a una longitud de 1530 nm. La longitud de la fibra dopada es de 7 m y la del montaje en total de unos 16. En el montaje también se incluye un WDM 980/1550 para introducir en el sistema el bombeo en 980 nm, el modelo CLD1015 de la marca Thotlabs con una potencia máxima de 330mW. Uno de los mayores problemas en los láser multi-lambda configurados en anillo es que la potencia umbral de oscilación para cada longitud de onda es diferente debido a la falta de uniformidad del espectro de ganancia del Erblio. Por este motivo se introduce un atenuador variable en cada rama, para ajustar las pérdidas en la cavidad en cada longitud de onda. Este montaje se puede observar en la Figura 4.4.1.

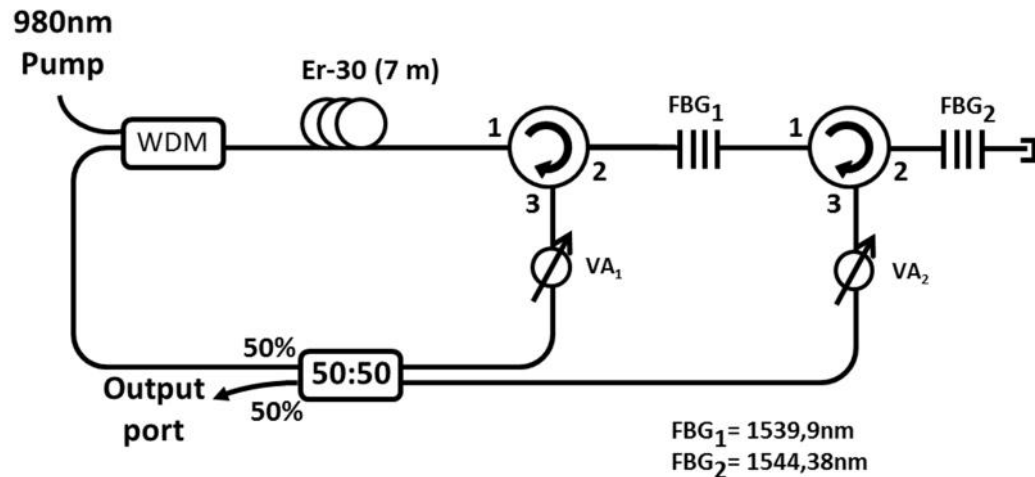


Fig. 4.4.1.: Esquema láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda

El funcionamiento del sistema es sencillo; se basa en la recirculación de la señal en un anillo donde la fibra dopada con Erblio como medio activo genera ganancia gracias al bombeo a 980 nm. Tras la fibra amplificadora se encuentra el primer circulador que pasa la señal desde el puerto uno al dos, donde se encuentra con el primer FBG. Éste refleja la primera longitud de onda que vuelve por el puerto dos hacia el tres donde es atenuada por el atenuador variable y llega al acoplador 50:50. El resto de la potencia no reflejada por el primer FBG continúa hacia el segundo circulador donde se refleja su longitud de onda, continúa por la rama con el atenuador variable y llega al acoplador donde se une a la longitud de onda de la otra rama. La potencia no reflejada en los FBG continúa hacia la terminación de la fibra, donde se pierde.

Tras el acoplador se tienen las dos longitudes de onda reflejadas de manera selectiva. A continuación se extrae un 50% de la señal que es analizada y el resto continúa de nuevo hacia el WDM donde se suma al bombeo y vuelve a amplificarse, completando el anillo que permite que el sistema llegue a oscilar.

Para el análisis de la potencia extraída se utilizó un analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA) con una resolución de 0.08 nm y un rango dinámico de más de 80 dB. La potencia que se obtiene con ambos canales correctamente configurados es de -30 dBm para ambos, 40 dB mayor que el ruido. La potencia utilizada de bombeo es de 110 mW para conseguir el umbral de oscilación láser, sin embargo se utilizan niveles de bombeo mayores para aumentar la estabilidad en potencia realizándose las pruebas desde 110 hasta 300 mW. Estos resultados se pueden observar en la Figura 4.4.2.

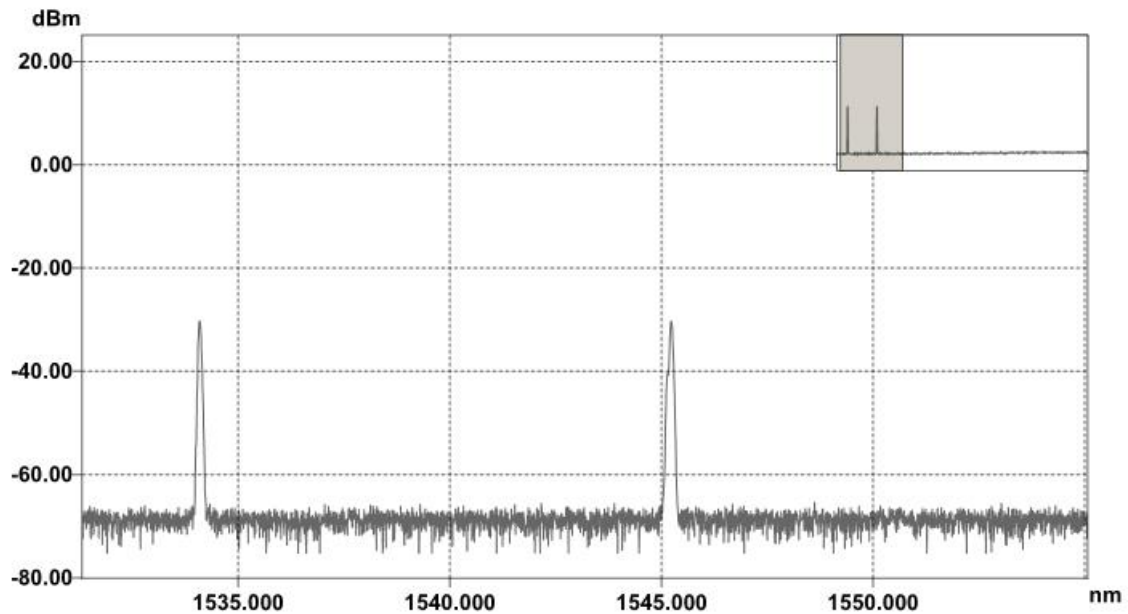


Fig. 5.4.2.: Líneas de emisión ecualizadas en operación monomodo analizada con OSA

4.4.2. Láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda medido mediante LUNA OBR 4600

Una vez realizado el montaje del láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda, es necesaria añadir al montaje una nueva configuración para realizar las medidas necesarias con LUNA OBR 4600. Para esta nueva configuración es necesario que por un lado del anillo pueda realizar el barrido frecuencial necesario del reflectómetro óptico, y una vez circulada la señal por todo el anillo, se extraiga para visualizar su resultado. Dicha configuración se basa en un acoplador en el que recircula un 70% situado entre el WDM y el acoplador de 50%. Al acoplador está conectado un circulador por el conector 3, que desde el conector 2, mediante un acoplador de 50% están conectados el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600 para realizar el barrido frecuencial y recibir resultados, y un analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA), con un aislador evitando problemas con el láser utilizado para sus medidas, para comprobar en qué momento se obtienen las líneas de emisión monomodo o multimodo. Desde el conector 1 del circulador, conectado al acoplador de 50% del anillo, saldrá la señal que se medirá mediante LUNA y BOSA simultáneamente, controlando inicialmente su potencia mediante un atenuador para evitar introducir demasiada potencia en los aparatos de medida. Esta configuración se puede observar en la Figura 4.4.3.

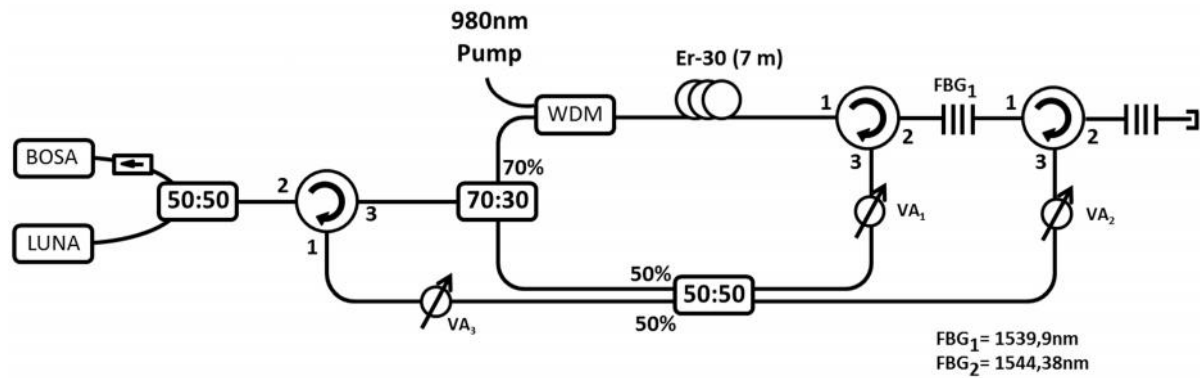


Fig. 4.4.3.: Esquema inicial láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda configurado para medir con LUNA OBR 4600.

Una vez configurado el montaje se realiza una prueba de medida con el objetivo de observar si funciona correctamente. Primero se comprueba que la potencia que va a llegar a LUNA y BOSA no sea mayor de lo que soportan dichos aparatos de medida, que en el caso de LUNA, que es el que limita en este caso, es de 3 mW. Después se consigue la ecualización de las dos líneas de emisión y se comprueba observando en el BOSA que dichas líneas de emisión se comportan mediante un solo modo. Una vez conseguido esto, y comprobado que al disminuir la amplitud de uno de las líneas de emisión pasan de ser monomodo a multimodo, se realiza la primera medida con LUNA.

En esta primera medida se observa en el BOSA un problema, ya que en el momento en el que se realiza la medida mediante LUNA, la amplitud de las líneas de emisión pierden su potencia y dejan de realizar el efecto laser durante un breve periodo de tiempo. La causa de esto se descubre que es debido a que cuando el reflectómetro óptico realiza el barrido frecuencial, al tener mucha más potencia este barrido que la potencia que circula por el anillo, anula las líneas de emisión que son necesarias para observar su operación monomodo.

Para evitar este efecto, se realiza un cambio en la configuración inicial mostrada en la Figura 4.4.3 añadiendo un atenuador entre el conector 3 del circulador más próximo a los aparatos de medida y el acoplador de 70%. Con esto se consigue atenuar la señal del barrido frecuencial que introduce LUNA en el anillo, intentando conseguir el compromiso entre disminuir la potencia del barrido frecuencial nombrado y que sea suficiente potencia para que le llegue la señal necesaria al propio LUNA, con la restricción obligatoria de que en el barrido frecuencial no dejen de emitir las líneas de emisión observadas mediante el BOSA. Este compromiso se obtiene al atenuar la señal del barrido frecuencial en 8.5dB mediante al atenuador. El esquema de la configuración final se muestra en la Figura 4.4.4, añadiendo el cambio de que, debido a que la potencia que le llega a LUNA es muy inferior a los 3 mW que soporta, no es necesario el uso del atenuador que se introdujo en el primer montaje para evitar dicho problema.

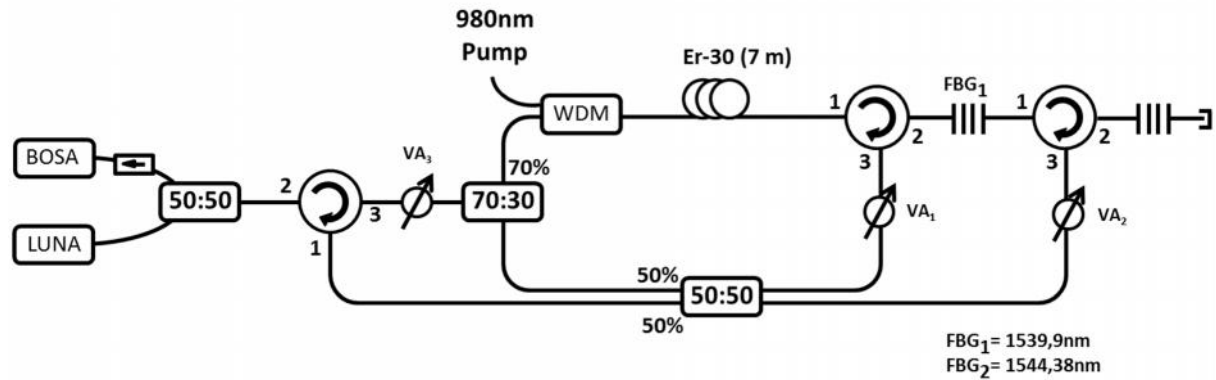


Fig. 4.4.4.: Esquema final láser en anillo con fibra dopada con Erblio para operación monomodo en doble longitud de onda configurado para medir con LUNA OBR 4600.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento, se pasa a la realización de las medidas.

4.4.3. Comparación monomodo vs multimodo mediante LUNA

Para el estudio de consecución de líneas de emisión monomodo mediante LUNA OBR se realiza una comparación entre diferentes casos:

- 2 líneas de emisión en operación monomodo: las dos líneas de emisión deben tener una amplitud similar, con una diferencia máxima entre ellas de unos 3dB para mantener su condición de emisión monomodo, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4.4.5. Esta figura es un ejemplo, las líneas de emisión monomodo realmente se centran en 1534nm y 1545nm.

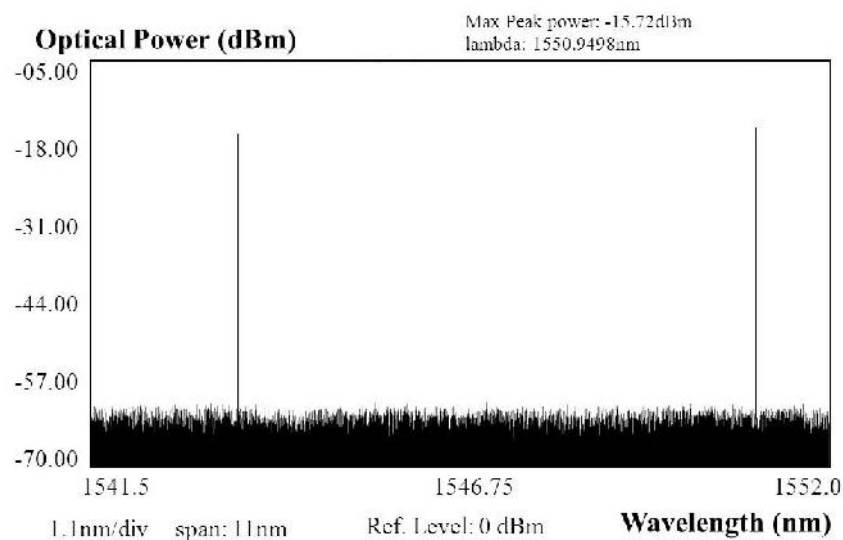


Fig. 4.4.5.: Ejemplo de dos líneas de emisión en operación monomodo [43]

Ampliando la resolución de BOSA se puede comprobar como verdaderamente es monomodo, tal como se aprecia en la Figura 4.4.6.

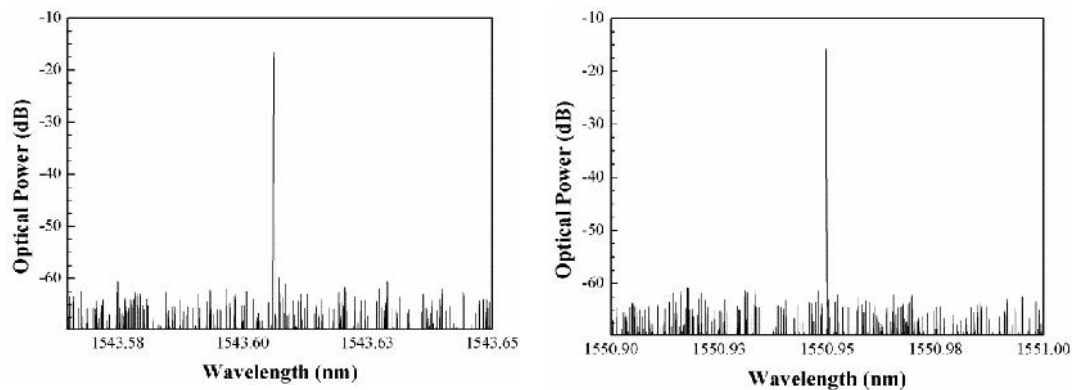


Fig. 4.4.6.: Ejemplo de línea de emisión monomodo

- 2 líneas de emisión en operación multimodo: para que esto ocurra deben estar ambas líneas de emisión emitiendo simultáneamente, pero la diferencia de amplitud entre ellas a de superar los 3dB. Este caso se muestra en el ejemplo de la figura 4.4.7, aunque en este estudio las líneas de emisión se centran en 1534nm y 1545nm, siendo la de 1545nm la más atenuada de las dos.

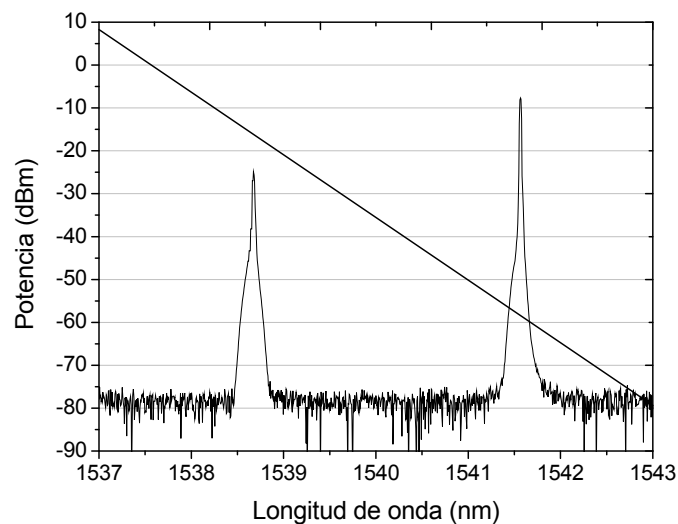


Fig. 4.4.7.: Ejemplo de dos líneas de emisión en operación multimodo

Aumentando la resolución del BOSA se puede comprobar cómo en este caso la emisión es multimodo, tal y como se observa en el ejemplo la Figura 4.4.8.

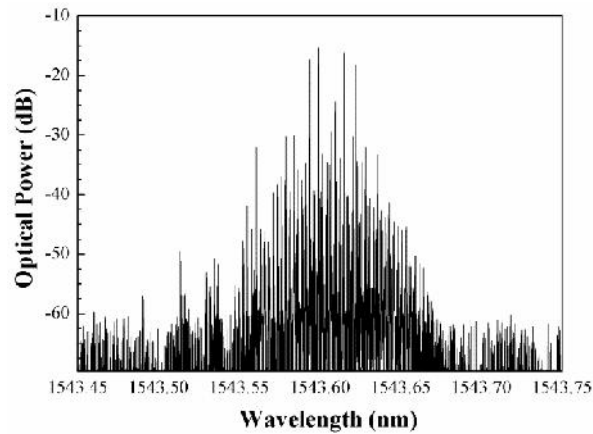


Fig. 4.4.8.: Ejemplo de línea de emisión multimodo

- Atenuando una de las líneas de emisión y dejando que la otra obtenga un comportamiento multimodo: como se observa en el ejemplo de la Figura 4.4.9, una de las líneas de emisión, la que en el estudio está centrada en 1539.9nm, se mantiene en acción laser y muestra un comportamiento multimodo, mientras que la otra línea de emisión, centrada en 1544.33nm, se atenúa totalmente.

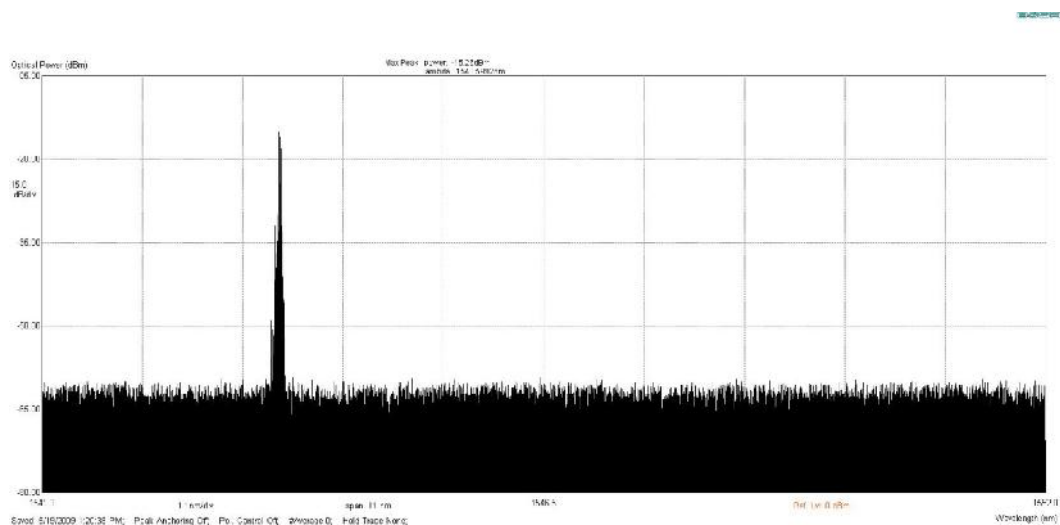


Fig. 4.4.9.: Ejemplo de una líneas de emisión en operación multimodo

Estos tres casos han sido analizados experimentalmente mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600, comprobando así las diferencias entre las líneas de emisión en operación monomodo, es decir, el primer caso mostrado en la Figura 4.4.5, y las líneas de emisión en operación multimodo. Estos resultados se muestran en las Figuras 4.4.7 y 4.4.9. Cabe destacar que las siguientes medidas obtenidas muestran, en la misma gráfica, los tres casos para realizar una mejor comparación, diferenciándose por colores de la siguiente manera:

- 2 líneas de emisión en operación monomodo: **rojo**
- 2 líneas de emisión en operación multimodo: **negro**
- 1 línea de emisión en operación multimodo y otra línea de emisión atenuada: **verde**

Estas medidas se han analizado en términos de amplitud respecto a la distancia, derivada de la fase respecto a la longitud de onda y polarización frente a la distancia. En este último caso, la polarización, se ha descartado su análisis en profundidad dada la complejidad para su comprensión, siendo necesario un estudio detallado respecto a polarizaciones, y no disponiendo de tiempo para ello.

A continuación, en las Figuras 4.4.10 y 4.4.11, se muestra la amplitud y la derivada de la fase del FBG centrado a la longitud de onda de 1534nm. Estos datos resultan de gran interés ya que en torno a la longitud de onda central del FBG es donde se genera la línea de emisión. Como se puede observar, la amplitud en torno al FBG, cuyo comportamiento se ha estudiado en el CAPÍTULO IV montaje 4.3 (LUNA: comportamiento de componentes y mejora de resolución.), el pico de emisión más pronunciado tiene una amplitud similar, pero los valles que se observan a su alrededor son mucho más pronunciados en el caso del líneas de emisión monomodo que en el caso de emisión multimodo.

En cuanto a la derivada de la fase, se puede observar cómo en el lugar donde se encuentra el FBG, la derivada de su fase se localiza exactamente en la longitud de onda central de dicho FBG, 1534nm para el ejemplo que nos ocupa, siendo dicha longitud menor para el caso de emisión monomodo.

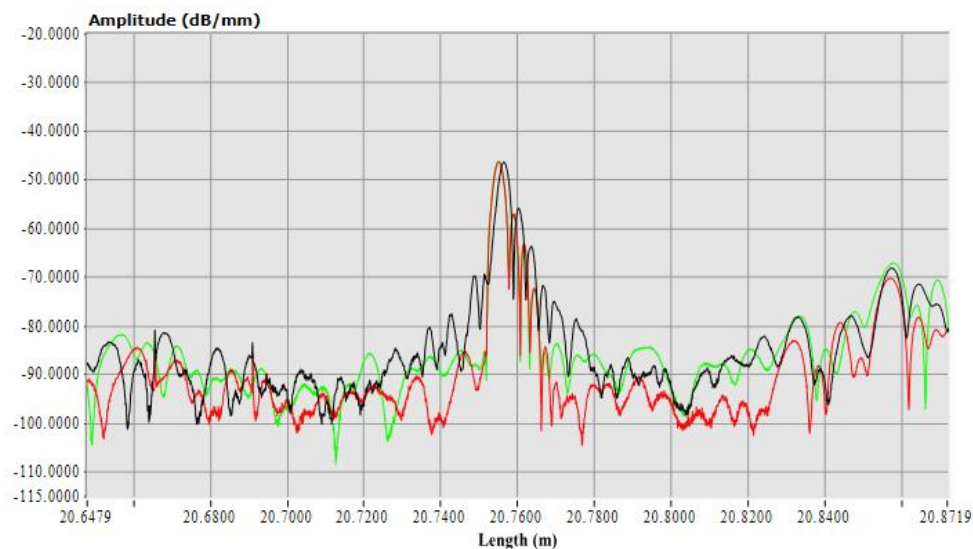


Fig. 4.4.10.: Medida de la amplitud respecto a la distancia del FBG centrado a 1534nm dentro del anillo analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

En los tramos de fibra óptica donde no se encuentran los FBGs se observa cómo la longitud de onda oscila aleatoriamente entre 1525nm y 1610nm (debido al barrido que hace LUNA), teniendo más oscilaciones en el caso de líneas de emisión monomodo, alguna menos en el caso de dos líneas

de emisión multimodo, y muy poca oscilación en el caso de solamente una línea de emisión multimodo.

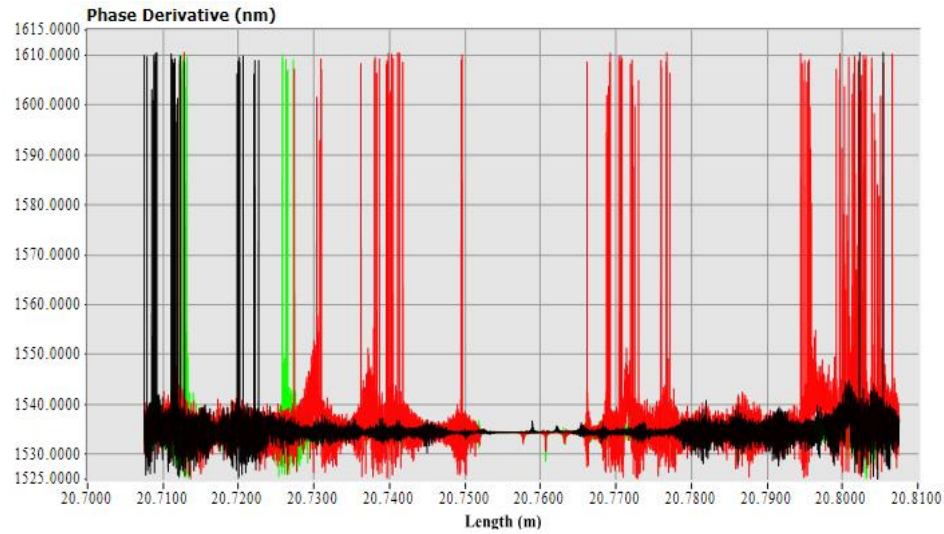


Fig. 4.4.11.: Medida de la derivada de la fase respecto a la distancia del FBG centrado a 1534nm dentro del anillo y analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

En el caso del FBG centrado en 1545nm, como se muestran en las Figuras 4.4.12 y 4.4.13, los resultados son similares al caso anterior. Sin embargo, en este caso no vemos ninguna respuesta en la zona de interés ya que la línea de emisión atenuada (en el caso del estudio de una sola línea de emisión), es la centrada en 1545nm. Lo mismo sucede en la derivada de la fase, donde su respuesta no se encuentra centrada en esta longitud de onda, 1545nm.

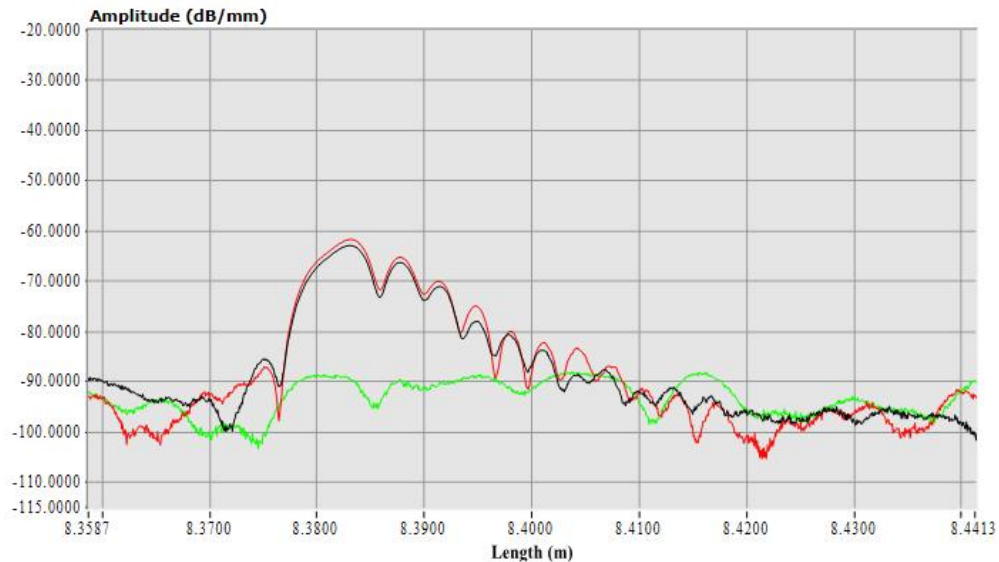


Fig. 4.4.12.: Medida de la amplitud respecto a la distancia del FBG centrado a 1545nm dentro del anillo analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

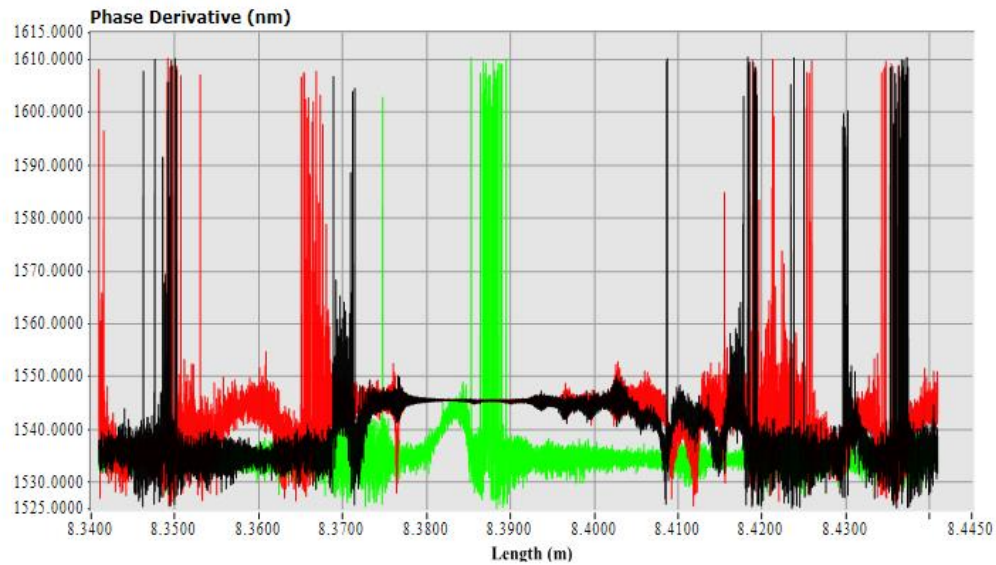


Fig. 4.4.13.: Medida de la derivada de la fase respecto a la distancia del FBG centrado a 1545nm dentro del anillo y analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

Por último, se han analizado también unos tramos de fibra óptica en los cuales no se encuentra ningún dispositivo con el fin de comparar el comportamiento de los casos estudiados anteriormente. Los resultados experimentales de las medidas de la amplitud y la derivada de la fase se muestran en las figuras 4.4.14 y 4.4.15. Observando la derivada de la fase en este caso, se demuestra que la oscilación de la longitud de onda es mayor en el caso monomodo respecto al multimodo con dos líneas de emisión, mientras que en el caso de una línea de emisión la oscilación es prácticamente testimonial, siendo este resultado similar a los casos analizados para los FBGs. En cuanto a la amplitud se observa que la variación es similar en todos los casos.

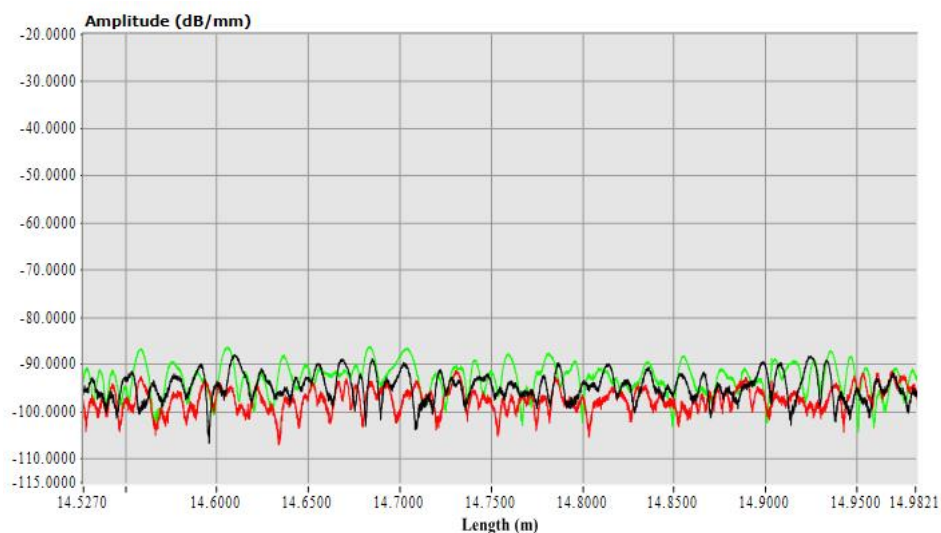


Fig. 4.4.14.: Medida de la amplitud respecto a la distancia de un tramo de fibra óptica dentro del anillo analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

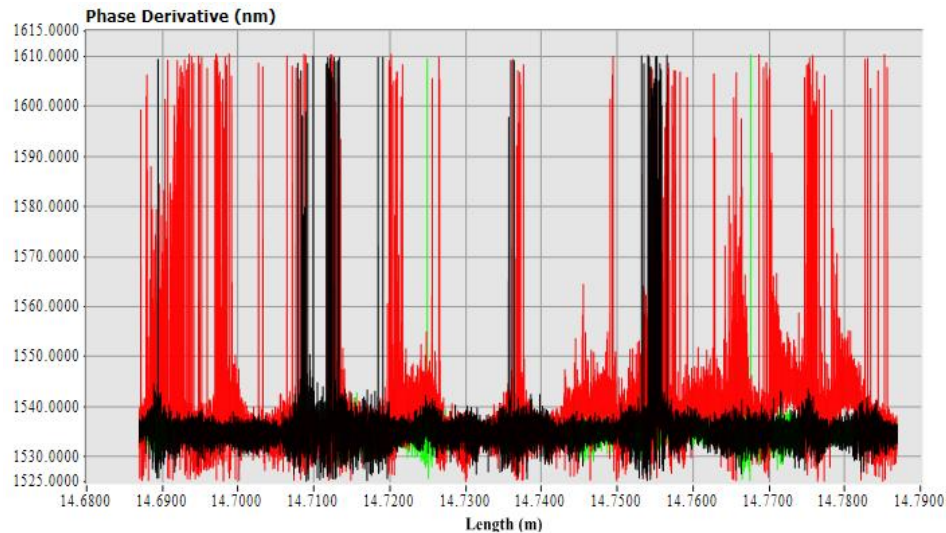


Fig. 4.4.15.: Medida de la derivada de la fase respecto a la distancia de un tramo de fibra óptica dentro del anillo analizado mediante el reflectómetro óptico LUNA

Una vez analizadas las medidas surgen diferentes dudas respecto a los resultados obtenidos. Como se puede apreciar en las figuras de la derivada de la fase, los cambios continuos y aleatorios de longitud de onda cuando no se encuentra en la línea de emisión tienen muchos puntos en 1525nm y en 1610nm, por lo que se tiene que descartar que en esas longitudes de onda no exista ningún tipo de emisión espontánea. Esto no tendría demasiado sentido, pero al ser unas longitudes de onda lejanas al rango deseado, no se realizó la dicha observación. Para ello, mediante el analizador de espectros se analizaron dichas longitudes de onda, obteniendo únicamente ruido, y descartando esa posibilidad.

En relación a este aspecto, también se analizó este anillo de fibra óptica sin el láser de bombeo, para comprobar así su comportamiento respecto a la derivada de la fase. En caso de ser similar a los cambios de longitud de onda anteriores, podemos deducir que esto es debido a la forma que el reflectómetro óptico LUNA tiene de evaluar las derivadas de la fase. El resultado de ese experimento se muestra en la Figura 4.4.16, obteniendo resultados aleatorios, como era de esperar.

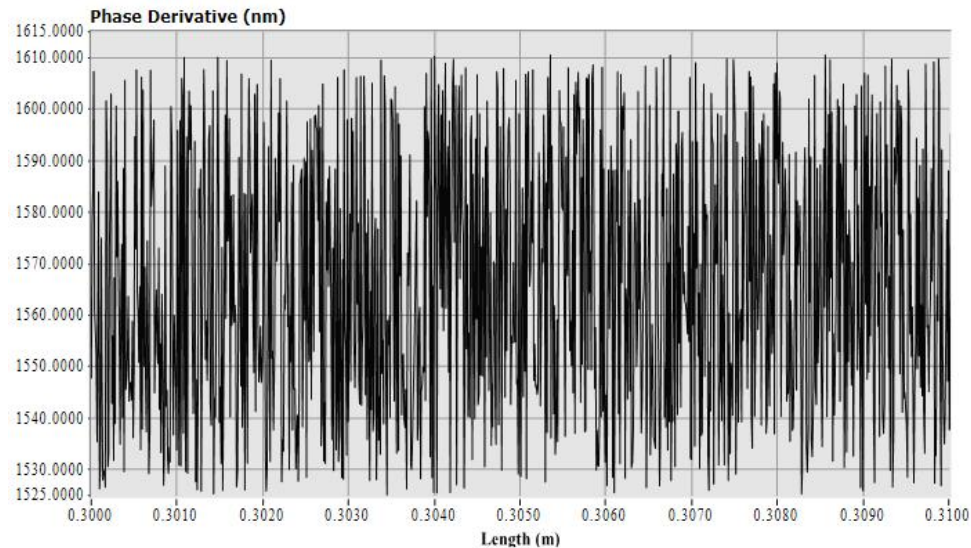


Fig. 4.4.16.: Medida de la derivada de la fase respecto a la distancia de un tramo de fibra óptica dentro del anillo de fibra óptica y analizada mediante el reflectómetro óptico LUNA

Otra duda que surge al realizar el análisis de la señales es si la anchura de la longitud de onda es similar para el caso de la emisión monomodo y multimodo. Para ello, en las medidas obtenidas, simplemente se hace necesario realizar un zoom en la zona de interés. En la Figura 4.4.17 se observa la amplitud y la derivada de la fase, obteniendo un resultado de gran interés. En dicha figura se muestra cómo el tramo en el que la longitud de onda de emisión tienen una menor oscilación es en el caso monomodo, donde la longitud de onda varía muchos menos en el tramo de fibra comprendido entre 17.970 y 17.972 metros, es decir durante 2 milímetros. Después su variación aumenta ligeramente. En cambio en el caso multimodo la variación de la longitud de onda es mínima durante el tramo de fibra en el cual su amplitud es máxima, en este caso, un tramo de unos 5 milímetros.

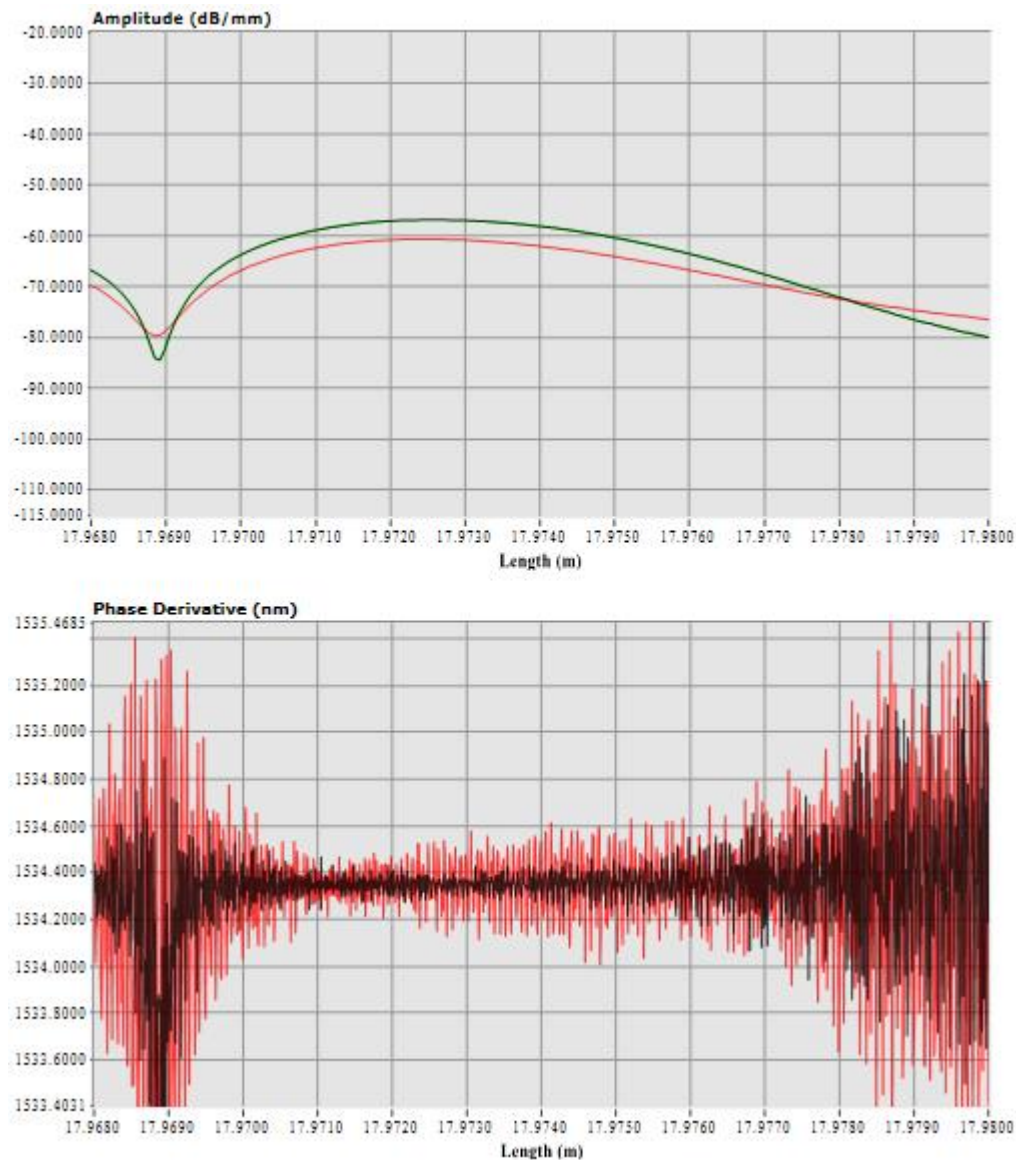


Fig. 4.4.17.: Amplitud y derivada de la fase ampliado en un tramo de fibra óptica dentro del anillo medido con LUNA

Por ultimo también se analizó mediante BOSA el rango de longitud de onda en el cual oscilan las líneas de emisión monomodo y multimodo, ya que a pesar de ser bastante estable, siempre tiene una pequeña oscilación en la cual las líneas de emisión varían. Se observan resultados similares para ambos casos, obteniendo una variación en la distancia de aproximadamente 0,05 milímetros.

Cabe destacar que debido a la complejidad de este estudio, junto a la limitación temporal para su realización, no ha sido posible profundizar en el análisis de los resultados obtenidos, pero como más adelante se explica en líneas futuras, este trabajo será continuado por los miembros del grupo de Comunicaciones Ópticas.

CAPÍTULO V Material utilizado

5.1. Material de medición

Optical Spectrum Analyzer (OSA)

MARCA: ADVANTEST

MODELO: Q8384

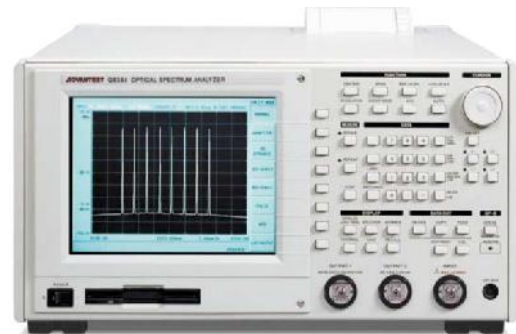
ESPECIFICACIONES

Resolución de longitud de onda:
10pm o mayor

Rango dinámico: 60dB o más

Precisión de longitud de onda: $\pm 0.05\text{nm}$

Rango de frecuencias: 48Hz a 66Hz



Electrical Spectrum Analyzer (ESA)

MARCA: ROHDE & SCHWARZ

MODELO: R&S FSP30 (1093.4495.30)

ESPECIFICACIONES

Resolución frecuencial (máx): 0.01 Hz

Rango dinámico del detector RMS: 100dB

Precisión de la medida total: $\pm 0.5\text{dB}$

Rango de frecuencias: 9 kHz a 30GHz

Ancho de banda de resolución (RBW) 10 Hz a 10 MHz



Brillouin Optical Spectrum Analyzer (BOSA)

MARCA: ARAGONPHOTONICS

MODELO: BOSA 200



| BOSA 100 ² & 200 series | C band model | C+L band model |
|--|--|--------------------------|
| Optical Resolution (@3dB) ² | 80fm (10MHz @1550nm) | |
| Wavelength Range ³ | 1525 nm –1565 nm | 1525 – 1610 nm |
| Wavelength Accuracy ³ | ± 1 pm | ± 2 pm |
| Spurious-free Dynamic Range ² | >80dB | |
| Close-in Dynamic Range ² | >40 dB @ ±0.3 pm >60 dB @ ±0.6 pm | |
| Calibrated Input Power Range | +13 to -70dBm | |
| Maximum Safe Total Input Power | +20 dBm | |
| Sensitivity ² | -70dBm/0.1pm | |
| Power Accuracy ³ | ±0.5 dB | |
| Polarization Measurement | Two orthogonal polarization channels (+Option 230) Full state-of-polarization measurement | |
| Measurement time ³ | 1s for a 10 nm span | |
| Internal Wavelength Calibrator | C12 HCN | C12HCN + C12 CO + C13 CO |

LUNA

MARCA: LUNA

MODELO: OBR4600



| PARAMETER | | SPECIFICATION | | UNITS |
|---|-----------------|--------------------------------|-------------------------|---------|
| Maximum Device Length: | | | | |
| Standard Mode | | 30 or 70 | | meters |
| Long Range Mode ¹² | | 2000 | | meters |
| Spatial Resolution (two-point) ¹ : | | | | |
| | | 10 μm over 30 meters | | |
| | | 20 μm over 70 meters | | |
| | | 1 mm over 2 km | | |
| Dead Zone: | | | | |
| | | Equals 2-pt spatial resolution | | |
| Wavelength Range ² : | | | | |
| | | 1265-1335 or 1525-1610 | | nm |
| Wavelength: | | | | |
| Resolution (max) | | 0.02 | | pm |
| Accuracy ³ | | ±1.5 | | pm |
| Integrated Return Loss Characteristics: | | | | |
| Dynamic range ⁴ | | 70 | | dB |
| Total range | | 0 to -125 | | dB |
| Sensitivity | | -130 | | dB |
| Resolution ⁵ | | ±0.05 | | dB |
| Accuracy ⁵ | | ±0.10 | | dB |
| Integrated Insertion Loss Characteristics: | | | | |
| Dynamic range ⁵ | | 18 | | dB |
| Resolution ⁵ | | ±0.05 | | dB |
| Accuracy ⁵ | | ±0.10 | | dB |
| Group Delay: | | | | |
| Accuracy | | 1.0 | | ps |
| Distributed Sensing ^{7,12,13} : | | | | |
| Spatial Resolution ⁸ | | ±1.0 | | cm |
| Temperature Resolution ⁹ | | ±0.1 | | C |
| Strain Resolution ⁹ | | ±1.0 | | μstrain |
| Measurement Timing ¹⁰ | Standard | Fast ¹¹ | Spot Scan ¹¹ | |
| 5 nm scan time | 3 | 1.6 | 0.3 | s |
| Time vs. wavelength range | 2.1 s+0.14 s/nm | 1.3 s+0.06 s/nm | 0.15 s+0.02 s /nm | - |
| Long Range (2 km) Scan Time | | 20 | | s |

5.2. Componentes activos

Láser sintonizable Agilent

MARCA: AGILENT

MODELO: 8164B



ESPECIFICACIONES

| | |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Rango: | 1450-1590nm |
| Resolución: | 0.1pm, 12.5 MHz a 1550 nm |
| Precisión en selección emisión: | 1pm |
| BW espectral: | 100kHz (control de coherencia OFF) |
| Pout_max: | -1dBm (bajo SSE);7 dBm (alta pot) |
| RIN: | -145dB/Hz |

Láser Raman

MARCA: IPG Fibertech

MODELO: RLD-3K-1445



ESPECIFICACIONES

| | |
|------------------------------|----------------------------|
| Modo de operación: | CW |
| Polarización: | Aleatoria |
| Longitud de onda de emisión: | 1445 nm |
| Potencia máxima: | 3.2 W |
| Ancho espectral 3dB: | 0.5 nm (min), 2.5 nm (máx) |
| Supresión de lóbulo lateral: | 45dB |

Láser de bombeo 980 nm Amonics

MARCA: Amonics

MODELO: ALD98-100-B-FA



ESPECIFICACIONES

| | |
|-------------------------------|----------|
| Modo de operación: | CW |
| Estabilidad en potencia (8h): | 0.02 dB |
| Longitud de onda de emisión: | 976 nm |
| Potencia máxima: | 139 mW |
| FWHM (2.35 σ): | 0.616 nm |

Láser de bombeo 980 nm 330mW

MARCA: Thorlabs

MODELO: PL980P330J - 975 nm, 330 mW



Characteristics ($T_c = 25^\circ\text{C}$, $P = 330\text{ mW}$)

| SPECIFICATION | SYMBOL | MIN | TYPICAL | MAX |
|----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|------------------------------|
| Center Wavelength | λ_c | 974 nm | 975 nm | 976 nm |
| Operating Current | I_{OP} | – | 600 mA | 720 mA |
| Output Power | P_{OUT} | 330 mW | – | – |
| Spectral Bandwidth (FWHM) | $\Delta\lambda$ | – | 0.5 nm | 1.0 nm |
| Spectral Bandwidth (@ 95% Power) | $\Delta\lambda$ | – | – | 2.0 nm |
| Threshold Current | I_{TH} | – | 75 mA | 90 mA |
| Forward Voltage @ IOP | V_F | – | 1.7 V | 1.9V |
| Kink-Free Power | P_{Kink} | 363 mW | – | – |
| Spectral Shift with Temperature | $\Delta\lambda/\Delta T$ | – | – | 0.02 nm / $^\circ\text{C}$ |
| Side Mode Suppression | – | -13 dB | – | – |
| Monitor Responsivity | R_{PD} | 1 $\mu\text{A} / \text{mW}$ | – | 10 $\mu\text{A} / \text{mW}$ |
| TEC Operation | | | | |
| TEC Current | I_{TEC} | – | 1.2 A | 1.8 A |
| TEC Voltage | V_{TEC} | – | 2.0 V | 3.0 V |
| Thermistor Resistance | R_{TH} | 9.5 k Ω | 10 k Ω | 10.5 k Ω |
| Thermistor Constant | B | 3600 K | 3920 K | 4200 K |

Waveshaper

MARCA: WAVESHAPER

MODELO: 1000S



ESPECIFICACIONES

| | |
|------------------------|---------------------------|
| Rango de frecuencia: | 191.250 THz - 196.275 THz |
| Ancho de banda: | 10 GHz - 5 THz |
| Resolución máxima: | ± 1 GHz (± 8 pm) |
| Perdidas de insercion: | 4.5dB |

Cámara climática

MARCA: BINDER

MODELO: FD-23



ESPECIFICACIONES

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Rango de temperatura: | 300°C |
| Variación de temperatura: | a 70°C 0.8°C |
| | a 150°C 2.2°C |
| | a 300°C 4.3°C |
| Fluctuación de la temperatura: | $\pm 0.3^\circ\text{C}$ |
| Tiempo de calentamiento: | hasta 70°C 7min |
| | hasta 150°C 22min |
| | hasta 300°C 45min |

5.3. Componentes pasivos

Fibra monomodo estándar

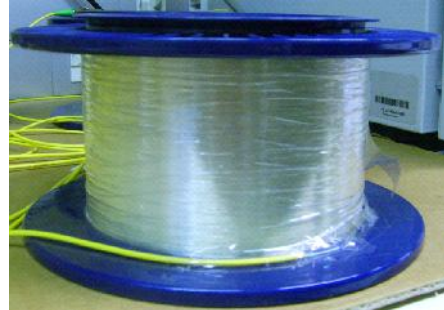
MARCA: TELNET

MODELO: SMF

ESPECIFICACIONES

Atenuación: 0.208dB/Km

Longitud: ± 1 m



Fibra compensadora de dispersión (DCF)

MARCA: TELNET

MODELO: Fibra SMF

ESPECIFICACIONES

Atenuación: 0.55dB/Km



Fibra fuertemente dopada con Erblio (Liekki Er30)

Er30-4/125

Er30-4/125HC

Erbium Doped Fiber

The Nanoparticle Fiber Company

Liekki DND technology

Liekki uses its proprietary Direct Nanoparticle Deposition (DND) technology and long term experience of conventional fiber manufacturing technologies to provide customers with high-quality state-of-the-art fibers. Highly-doped Liekki fibers minimize required application fiber length, provide strong amplification, high efficiency, broad and flat gain profile, excellent beam quality, and reduced nonlinear effects.

Product description

Liekki Er30-4/125 is a highly doped erbium fiber designed for C- and L-band amplifiers and ASE sources. This fiber is available in two versions: low cut-off and high cut-off. The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20m.

| Applications | Features and benefits |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> C- and L-band DWDM, Metro and CATV ASE sources | <ul style="list-style-type: none"> Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape Very short fiber lengths reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS Wide and flat spectrum Low polarization mode dispersion, typical value <25fs/m Low splice loss, Liekki EasySplice program for splicing parameters Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified Dual layer UV-cured acrylate coating |

Specifications

| | Value | Unit |
|-----------------------------------|---------------------|------|
| Optical | | |
| Mode field diameter at 1550nm | 6.5 ± 0.5 | µm |
| Peak core absorption at 1530nm | 30 ± 3 | dB/m |
| Core numerical aperture (nominal) | (0.2) | |
| Cut-off wavelength | 800-980 | nm |
| high cut-off (-HC) option | 1000-1400 | nm |
| Geometrical and mechanical | | |
| Core concentricity error | < 0.7 | µm |
| Cladding diameter | 125 ± 2 | µm |
| Cladding geometry | round | |
| Coating diameter | 245 ± 15 | µm |
| Coating material | high index acrylate | |
| Proof test | > 1 | % |

Performance data

Absorption and emission spectra

C+L-band ASE source with Er30

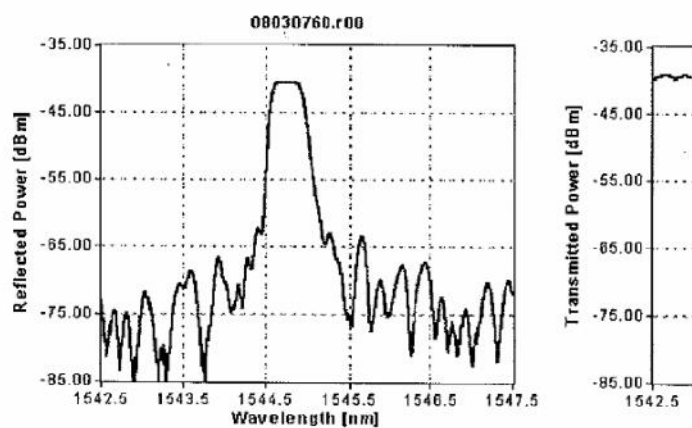
ISO9001:2000 certified 06/2005/MS6

Specifications subject to change without notice.

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|
| Address | Phone | Fax | Email | Website |
| Sorronrinne 9, 08500 LOHJA FINLAND | +358 19 357 391 | +358 19 357 3949 | liekki@liekki.com | www.liekki.com |

Red de difracción Bragg sintonizable**FBG Data Sheet**

| | |
|----------|--|
| Company: | Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH |
| Address: | Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany |
| Phone: | +49 (0)351 4960 193 |
| Fax: | +49 (0)351 4960 194 |
| E-mail: | info@aos-fiber.com |
| Web: | www.aos-fiber.com |

OSA traces:**Measured Parameters**

| Reflection Bandwidth | [nm] | [GHz] | Center Wavelength |
|----------------------|-------|-------|-------------------|
| | | | Center Frequency |
| | | | Transmissior |
| -1.0 dB | 0.325 | 40.8 | Reflectivity |
| -3.0 dB | 0.390 | 48.9 | SNR @+/-1nm |
| -20 dB | 0.664 | 83.5 | |

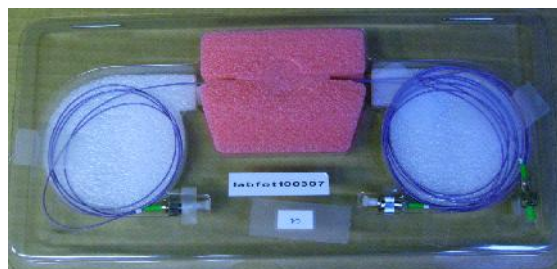
Circulador de tres puertos

MARCA LZX

MODELO CR-3-145-P-09-1FC/APC

ESPECIFICACIONES

| | | |
|------------------------|----------|--------|
| Pérdidas de inserción: | de 1 a 2 | 0.6dB |
| | de 2 a 3 | 0.61dB |
| Aislamiento: | de 2 a 1 | 57dB |
| | de 3 a 2 | 60dB |

Acopladores**Acopladores 50:50**

MARCA: TELNET

MODELO: WIC 2x2



ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción

| | | |
|-----------|----------|--------|
| Puerto 1: | PA (50%) | 3.56dB |
| | PB (50%) | 3.57dB |
| Puerto 2: | PB (50%) | 3.67dB |
| | PA (50%) | 3.33dB |

Estabilidad con la polarización <0.15dB

Directividad: >55dB

Acopladores 95:5

MARCA: TELNET

MODELO: WIC 2x2

ESPECIFICACIONES**Pérdidas de inserción**

Puerto 1: PA (5%) 14.53dB

PB (95%) 0.54dB

Puerto 2: PB (5%) 14.77dB

PA (95%) 0.71dB

Estabilidad con la polarización <0.15dB

Directividad: >55dB

Multiplexor en longitud de onda**980/1550 (WDM)**

MARCA: OPNETI

MODELO: FWDM-95-2-1-FA

**ESPECIFICACIONES**

Longitud de onda (canal 1550): 1520-1600 nm

Longitud de onda (canal 980): 965-1000 nm

Pérdidas de inserción (canal 1550): 0.45 dB

Pérdidas de inserción (canal 1980): 0.6 dB

PDL: <0.02 dB

Pérdidas de retorno: > 60dB

CAPÍTULO VI Conclusiones y Líneas futuras

Conclusiones

Durante el presente Trabajo Fin de Máster se han estudiado y analizado diferentes estructuras, realizando un total de cuatro montajes diferentes. Estos cuatro montajes se pueden clasificar en dos partes, a la primera de ellas corresponden a los dos primeros en los cuales se analizaron varias estructuras en anillo con el fin de conseguir mejorar diversos aspectos de las estructuras existentes en la literatura actual. Cabe remarcar que los resultados experimentales de esta parte del trabajo han sido enviados a la revista IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology y que, en la actualidad, está en proceso de revisión cuyo título es “Experimental study of the SLM behavior and Remote Sensing Applications of a Multi-wavelength Fiber Laser topology based on DWDMs,”. Dicha documentación se adjunta en el ANEXO.

La segunda parte en la que se puede clasificar este TFM versa sobre el análisis de diferentes estructuras o componentes mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600. En este caso se han realizado dos montajes, uno de ellos centrado en la mejora de la resolución de LUNA, (siendo dicho reflectómetro óptico el que más resolución tiene en la actualidad del mercado), y un segundo montaje para el análisis de la consecución de líneas de emisión monomodo también mediante el reflectómetro óptico LUNA.

Como ya se ha explicado en los objetivos del proyecto (apartado 3.3), el TFM ha estado centrado en el estudio tanto teórico como experimental de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda (WDM) así como en el desarrollo de láseres de fibra con emisión multilínea. Por lo tanto, después de realizar este TFM, se puede afirmar que se han demostrado experimentalmente varias topologías de láseres multilínea en anillo con fibra óptica dopada con erbio, así como algunos láseres en anillo (apartado 4.1) mediante amplificación Raman (apartado 4.2) y utilizando redes de difracción Bragg en fibra óptica (FBGs) como elementos selectivos de longitud de onda.

El ensanchamiento de línea homogéneo de la fibra dopada con erbio a temperatura ambiente lleva a una fuerte competición entre modos y a una considerable pérdida de estabilidad en los niveles de potencia de salida [44], por lo que resulta muy difícil conseguir una operación multilínea y estable en estos tipos de láseres de fibra. Por esta razón se ha prestado una especial atención al diseño de diferentes configuraciones de estos láseres de fibra multilínea y con unos niveles de potencia de salida lo más estables posible, estudiando configuraciones lineales, en anillo o incluso cavidades híbridas para así tratar de minimizar todos estos inconvenientes y ofrecer además ventajas tales como la flexibilidad o una mayor simplicidad de dichas estructuras. Estos láseres poseen además la ventaja de ser configuraciones “todo-fibra”, tiene un bajo coste y pueden funcionar a temperatura ambiente con una gran estabilidad.

Los parámetros fundamentales estudiados en todas estas topologías propuestas han sido su estabilidad en longitud de onda y niveles de potencia de salida, la anchuras de línea, intentando que fueran lo más estrechas posible, la relación óptica señal a ruido, así como la calidad de las señales

obtenidas de los sensores en el caso de su utilización en redes de multiplexación de sensores de fibra óptica.

Los resultados obtenidos demuestran una mejora en la estabilidad medida tanto en longitud de onda como en niveles de potencia de salida, mejorando en muchos de los casos los valores obtenidos hasta la actualidad. Además, como se ha demostrado en el apartado 4.1, titulado “4.1 Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica mediante la introducción de PS-FBGs.”, se ha conseguido mejorar la anchura de línea consiguiendo que éstas sean más estrechas. Además, se ha obtenido una relación señal ruido con valores superiores a los 30dB, lo que resulta de gran utilidad para su uso con sensores remotos, situados a mucha distancia del emisor, como el estudiado en el apartado 4.2 “Aplicaciones como sensor remoto mediante el uso de amplificación Raman”.

Por otro lado en tercer montaje, es decir, el apartado 4.3 “LUNA: comportamiento de componentes y mejora de resolución.”, se ha demostrado que es posible aumentar la resolución del LUNA OBR 4600. Este aspecto resulta de gran relevancia para posibles estudios futuros basados en el análisis en profundidad del comportamiento de redes de difracción o estudios sobre parámetros como el “hole-burning”, que serán continuados por los miembros del grupo de Comunicaciones Ópticas.

En el cuarto montaje, apartado 4.4 “Estudio de consecución de líneas de emisión monomodo mediante LUNA OBR”, se ha comenzado una nueva línea de trabajo basada en el estudio y análisis de las líneas de emisión monomodo mediante la comparación de la emisión monomodo y multimodo. Se han obtenido resultados de gran interés, por lo que se prevé continuar con esta línea de investigación dentro del grupo de Comunicaciones Ópticas.

Líneas Futuras

Los resultados del Trabajo Fin de Máster sugieren nuevas líneas de investigación muy interesantes para seguir siendo analizadas y estudiadas en el futuro.

En los montajes 4.1, 4.2, 4.4 la selección de las longitudes de onda de operación del láser ha sido posible gracias al uso de redes de difracción de Bragg (FBGs). Por lo tanto una posible línea de investigación abierta podría tratar de reemplazar estos dispositivos de filtrado óptico por otros filtros sintonizables, mejorando así la capacidad de sintonización de estos láseres multilínea.

Continuando con el trabajo realizado en las estructuras de los montajes 4.1 (Láser monomodo multilínea utilizando DWDMs para sensores de fibra óptica mediante la introducción de PS-FBGs.) y 4.2 (Aplicaciones como sensor remoto mediante el uso de amplificación Raman), otra potencial línea de trabajo será la implementación de nuevas configuraciones o técnicas capaces de obtener más de cuatro líneas de emisión lo más estable posible, consiguiendo así aumentar el número de sensores ubicados a lo largo de la fibra óptica dentro de una misma estructura.

También podrían ser estudiados y analizados de forma experimental en nuestros montajes otras fibras dopadas con tierras raras en lugar de la fibra de sílice fuertemente dopada con erbio que se empleó en dichos diseños. Este es un campo en continua expansión y dichos materiales son de crucial importancia para la optoelectrónica y son ampliamente utilizados tanto en amplificadores de fibra como en ámbito de los láseres.

Por otro lado, y como se ha visto en el montaje 4.3 (LUNA: comportamiento de componentes y mejora de resolución.), los miembros del grupo de Comunicaciones Ópticas continuarán con este estudio preliminar llevado a cabo durante la ejecución experimental de este TFM. Para ello, se pretende crear un programa mediante Matlab para controlar el reflectómetro LUNA OBR 4600, y así conseguir automatizar las medidas realizadas condicho reflectometro. Con esto se conseguirá obtener una gran cantidad de medidas en cada estiramiento de aproximadamente $0.017\mu\text{m}$ (precisión máxima aproximada de los microposicionadores), para realizar un promediado y obtener medidas más precisas aún. . Estas medidas tendrán que ser llevadas a cabo utilizando una mesa óptica anti-vibraciones en horario nocturno, evitando cualquier tipo de vibración o perturbación ocasionada por otros equipos o el resto del personal del laboratorio. El principal objetivo de este estudio será conseguir el aumento de la resolución de LUNA OBR 4600 cuya viabilidad se ha demostrado en el montaje 4.3.

Además, una vez conseguido este aumento de la resolución en las medidas, este dispositivo será utilizado para el estudio en profundidad del efecto de “hole-burning” en las cavidades de fibra óptica. . El objetivo de este estudio estará centrado en localizar y aprovechar los máximos y mínimos en cuanto a niveles de potencia de salida generados dentro del anillo para implementar cavidades lo más optimizadas posibles mediante el uso de aisladores u otros dispositivos tal y como se ha estudiado experimentalmente en varias ocasiones.

Por último, se prevé que el grupo de Comunicaciones Ópticas continúe con el “Estudio de consecución de líneas de emisión monomodo mediante LUNA OBR”, montaje 4.4. Mediante este estudio se pretende demostrar tanto de forma experimental como teórica el motivo por el cual cuando obtenemos simultáneamente dos o más líneas de emisión si la diferencia entre sus niveles de potencia de salida es inferior a 3dB, pasa de tener un comportamiento multimodo a uno totalmente monomodo. Este efecto ha sido observado y analizado experimentalmente en numerosos trabajos realizados por el grupo de Comunicaciones Ópticas [43], [45], [46], [47], sin embargo aún no se ha podido encontrar una explicación teórica del mismo, por lo que su análisis resulta de gran importancia para dicho grupo.

CAPÍTULO VII Bibliografía

- [1] Rosa Ana Pérez-Herrera y Manuel López-Amo, “*Láseres de fibra óptica*”, Mundo Electrónico, No. 426, pp. 36-42, Marzo 2011.
- [2] S. Rota-Rodrigo, R.A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo and M. López-Amo, “*Low noise dual-wavelength erbium fiber laser in single-longitudinal-mode operation*,” Applied Physics B Lasers and Optics, Vol. 106, no. 3, pp 563-567, March 2012.
- [3] <http://www.conacyt.gob.mx/comunicacion/Revista/200/Articulos/Laseres/Laseres00.htm>
- [4] P. R. Morkel, “*Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers*”, CRC Press, 2001.
- [5] D. Leandro, “*Nuevas configuraciones para estructuras láser y multiplexación de sensores*”, Trabajo Fin de Master, UPNA 2012.
- [6] http://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html
- [7] H. H. Cerecedo Nuñez. y M. D. Iturbe Castillo. “*Rejillas de Bragg en Núcleo de Fibra Óptica de Vidrio*”, Revista Mexicana de Física, Vol. 44, No. 2, pp. 198, 1998.
- [8] Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics. Cap 10, Academic Press, London, 1995.
- [9] R. P. Kashyap, “*All-fibre narrow band reflection gratings at 1500 nm*”, Electronics Letters, Vol. 26, No. 11, pp. 730-732, 1990.
- [10] G. A. Ball, “*Standing-wave monomode erbium fiber laser*”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 7, pp. 613-615, 1991.
- [11] R.A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo, S. Diaz, M.A. Quintela, M. Lopez-Amo and J.M. López-Higuera, “*Stability comparison of two quadruple-wavelength switchable erbium-doped fiber lasers*”, Optical Fiber Technology, Vol. 16, No. 4, pp. 205-211, 2010.
- [12] L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo and M. López-Amo, “*Multiwavelength Fiber Laser Sources with Bragg-Grating Sensor Multiplexing Capability*,” Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 553-558, 2001.
- [13] R.A. Perez-Herrera, M.A. Quintela, M. Fernández-Vallejo, A. Quintela, M. Lopez-Amo and J.M. Lopez-Higuera, “*Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped Er-fibers*”, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 27, No. 14, pp. 2563-2569, 2009.
- [14] R.A. Perez-Herrera, “*Experimental optimization in terms of power stability and output power of highly Er-doped fiber lasers with single and hybrid cavities*”, Fiber and Integrated Optics, Vol. 29, No. 2, pp. 106-120, 2010.
- [15] F. Liegeois, “*Mid-term stability of a fiber ring laser with a wavelength-tunable Fabry-Perot filter*”, in Proceedings of SPIE, Vol. 5480, No. 36, pp. 36-45, 2004.
- [16] C.H. Yeh, “*Dual-Wavelength S-Band Erbium-Doped Fiber Double-Ring Laser*”, Laser Physics, Vol. 18, No. 12, pp. 1553-1556, 2008.
- [17] V. Deepa, “*Linewidth characteristics of a filterless tunable erbium doped fiber ring laser*”, Journal of Applied Physics, Vol. 102, No. 8, art. no. 083107-4, 2007.
- [18] Y. Liu, “*Stable room-temperature multi-wavelength lasing realization in ordinary erbium-doped fiber loop lasers*”, Optics Express, Vol. 14, No. 20, pp. 9293-9298, 2006.

- [19] <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=36248>
- [20] <http://www.conacyt.gob.mx/comunicacion/Revista/200/Articulos/Laseres/Laseres03.htm>
- [21] <http://www.optoiq.com/index/lasers-for-manufacturing/display/ils-article-display/247670/articles/industrial-laser-solutions/volume-21/issue-2/features/high-power-fiber-lasers-gain-market-share.html>
- [22] Sergio Rota-Rodrigo, Rosa A. Perez-Herrera, Isidoro Ibañez, Ana M. R. Pinto, Montserrat Fernandez-Vallejo and Manuel Lopez-Amo, “*Multiwavelength Fiber Ring Laser based on Optical Add-Drop Multiplexers and a Photonic Crystal Fiber Sagnac interferometer*,” Optics & Laser Technology, Vol. 48, pp. 72–74, June 2013.
- [23] Daniel Leandro, Rosa Ana Pérez-Herrera, Sergio Rota-Rodrigo, Manuel López-Amo “*Multi-wavelength fiber laser in single-longitudinal mode operation based on DWDMs for sensing applications*” RIAO/OPTILAS 2013, VIII Iberoamerican Conference on Optics, XI Latinamerican meeting on Optics, Lasers and Applications, RIA13-RIA100-506, Oporto, Portugal, del 22 al 26 de Julio de 2013.
- [24] G.Luo, J.L. Zyskind, J.A. Nagel and M.A. Ali “*Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks*,” J. Lightwave Technol., vol. 16, No. 4, 1998.
- [25] A. Gusarov and F. Liegeois, “*Experimental study of a tunable fiber ring laser stability*,” Opt. Commun., vol. 234, pp. 391-397, 2004.
- [26] M. A. Quintela, R. A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo and J. M. López-Higuera, “*Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by single-mode operation*,” IEEE Photonics Technology Letters, vol. 22, pp. 368-370, 2010.
- [27] Rosa Ana Pérez Herrera, “*Design and characterization of wavelength division multiplexed sensor systems using optical amplification*” Tesis Doctoral, UPNA 2010.
- [28] R. A. Pérez-Herrera, M. A. Quintela, M. Fernández-Vallejo, A. Quintela, M. López-Amo and J. M. López-Higuera, “*Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped er-fibers*,” J. Lightwave Technol., vol. 27, pp. 2563-2569, 2009.
- [29] H. L. An, X. Z. Lin, E. Y. B. Pun and H. D. Liu, “*Multi-wavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter*,” Opt. Commun., vol. 169, pp. 159-165, 1999.
- [30] Sergio Rota-Rodrigo, “*Desarrollo de estructuras avanzadas de fibra óptica para sensores y láseres*”, Trabajo Fin de Master, UPNA 2011.
- [31] Diaz, S., Abad, S., and Lopez-Amo, M., “*Fiber optic sensor active networking with distributed erbium doped fiber and Raman amplification*,” Laser & Photonics Reviews, Vol. 2(6), 480-497, 2008.
- [32] T. Okoshi, K. Kikuchi and A. Nakayama. “*Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum*”. Electron. Lett. 16(16), 630-631, 1980.

- [33] T. Saitoh, K. Nakamura, Y. Takahashi, H. Iida, Y. Iki, and K. Miyagi, "Ultra-long-distance fiber Bragg grating sensor system". *IEEE Photonics Technology Letters*, 19(20), 1616-1618, 2007.
- [34] M. Fernandez-Vallejo, D. Leandro, A. Loayssa and M. Lopez-Amo. "Fiber Bragg grating interrogation technique for remote sensing (100km) using a hybrid Brillouin-Raman fiber laser". 21st Int. Conf. on Optical Fiber Sensors; Ottawa, ON; Canada; Article number 77537I. Proc. SPIE, 7753, 2011.
- [35] D. Leandro, A. Ullan, A. Loayssa, J. M. López-Higuera and M. López-Amo, "Remote (155 km) fiber bragg grating interrogation technique combining Raman, Brillouin, and erbium gain in a fiber laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(10), 621-623, 2011.
- [36] M. Fernandez-Vallejo, M. Bravo and M. Lopez-Amo. "Ultra-long laser systems for remote fiber Bragg gratings arrays interrogation" *IEEE Photonics Technology Letters*, 25(14), 1362-1364, 2013.
- [37] J. Xiu-jie, L. Yan-ge, S. Li-bin, G. Zhan-cheng, F. Sheng-gui, K. Gui-yun and D. Xiao-yi "A tunable narrow-line-width multi-wavelength Er-doped fiber laser based on a high birefringence fiber ring mirror and an auto-tracking filter", *Optics Communications*, vol. 281, n1, pp. 90-93, 2008.
- [38] Z. Chun-Liu, Y. Xiufeng, L. Chao, N. Jun Hong, G. Xin, P. Roy Chaudhuri, D. Xinyong, "Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers by using cascaded fiber Bragg gratings written in high birefringence fiber", *Optics Communications*, vol. 230, n. 4-6 (2004), pp. 313–317, 2004.
- [39] M. Fernandez-Vallejo, S. Diaz, R.A. Perez-Herrera, R. Unzu, M.A. Quintela, J.M. Lopez-Higuera and M. Lopez-Amo "Comparison of the stability of ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using Raman or Er-doped fiber amplification", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 45, No. 12, pp. 1551-1557, 2009.
- [40] Sergio Rota-Rodrigo, Rosa A. Perez-Herrera, Isidoro Ibañez, Ana M. R. Pinto, Montserrat Fernandez-Vallejo and Manuel Lopez-Amo "Multiwavelength Fiber Ring Laser based on Optical Add-Drop Multiplexers and a Photonic Crystal Fiber Sagnac interferometer", *Optics & Laser Technology*, Vol. 48, pp. 72–74, 2013.
- [41] S. Pan, Z. Xiaofan and L. Caiyun, "Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 764-766, 2008.
- [42] K. Zhang and J. U. Kang, "C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser," *Optics Express*, vol. 16, pp. 14173-14179, 2008.
- [43] M. A. Quintela, R. A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo and J. M. López-Higuera, "Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by single-mode operation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 368-370, 2010.
- [44] A. Bellemare "Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers," *Progress in Quantum Electronics*, Vol. 27, No. 4, pp. 211-266, 2003.

- [45] R. A. Perez-Herrera, A. Ullan, D. Leandro, M. Fernandez-Vallejo, M. A. Quintela, A. Loayssa, J. M. Lopez-Higuera and M. Lopez-Amo, “*L-Band Multiwavelength Single-Longitudinal Mode Fiber Laser for Sensing Applications*” IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 8 , art. no. 6062627 , pp. 1173-1177, 2012.
- [46] S. Rota-Rodrigo, R.A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo and M. López-Amo, “*Low noise dual-wavelength erbium fiber laser in single-longitudinal-mode operation,*” Applied Physics B Lasers and Optics, Vol. 106, no. 3, pp 563-567, March 2012.
- [47] R.A. Perez-Herrera, A. Ullan, D. Leandro, M. Fernandez-Vallejo, M.A. Quintela, A. Loayssa, J. M. Lopez-Higuera and M. Lopez-Amo, “*L-Band Multiwavelength Erbium-Doped Fiber Ring Laser for Sensing Applications,*” 21st International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-21), Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7753, art. no. 77533C, Ottawa, Canada, 15-19 May 2011.

Anexo

Publicación (en revisión)

Los anexos de este documento se han eliminado debido a que contienen información confidencial para satisfacer la ley de protección de datos (LPD). Si desea obtener más información, puede ponerse en contacto con el autor o el tutor de este documento.

CONFIDENCIAL